ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области прикладных математики и физики в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений по направлению «Прикладные математика и физика»

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 621.039.524(075.8)
ББК 31.46я73
Ф50

Авторы
В.И. Бойко, Ф.П. Кошелев,
И.В. Шаманин, Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова

Физический расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах:
Ф50 учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 504 с.

В учебном пособии содержатся необходимые сведения по проектированию реакторной части ядерно-энергетической установки на тепловых нейтронах. Это позволяет выбрать материалы и обосновать конструкцию активной зоны реактора, выполнить нейтронно-физический и теплогидравлический расчет, расчет защиты, а также определить параметры различных состояний реактора.

Пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, обеспечение безопасности и противодействие терроризму» и предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по физико-техническим специальностям.

УДК 621.039.524(075.8)
ББК 31.46я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук, профессор ТПУ
А.П. Вергун

Доктор физико-математических наук, профессор ТГУ
И.М. Васенин

© Авторы, 2009
© Томский политехнический университет, 2009
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня уже очевидно, что перспективы энергообеспечения на длительный период времени не могут более связываться с углеводородным топливом, как базовым энергоисточником. Аргументы здесь известны: это топливо невозобновляемо, ресурсы его ограничены, стоимость добычи и транспортировки неумолимо растёт и, наконец, энерготехнологии на его основе не могут в принципе удовлетворять экологическим требованиям, соответствующим современному пониманию процессов, происходящих в окружающей среде.

Вся промышленная деятельность человечества (в том числе и атомная, и тепловая энергетика) оказывает техногенное воздействие на окружающую природную среду. Но когда начинаешь сравнивать вред от других технологий, общий риск для жизни, то приходишь к выводу, что без АЭС может быть ещё хуже.

В XXI веке к атомной энергетике предъявляются 5 основных требований: безопасность, утилизация плутония и недопущение его распространения, топливообеспечение, переработка и захоронение РАО, экономичность, конкурентоспособность.

Триединство качеств ядерной энергетики – огромный энергоресурсный (теплотворная способность ядерного топлива в 2–3 млн раз больше, чем у традиционных видов), энергоэкономический (экономический показатель не зависит от места расположения) и энергоэкологический (отсутствие вредных выбросов) потенциалы позволят выполнить эти основные требования.

В настоящее время атомная энергетика сохраняет свои позиции как один из основных мировых источников энергии.

На атомную энергию приходится 6 % мирового топливно-энергетического баланса и 17 % производимой электрической энергии.

Наработано уже более 10000 реакторо-лет, из них 7000 без крупных аварий после апреля 1986 года. В 2020 году будет эксплуатироваться более 500 блоков АЭС.

В 2006 году в 31 странах мира действовало 442 энергоблока, в стадии строительства находятся 35 энергоблоков.

В дополнение к атомным электростанциям имеется около 300 научно-исследовательских и экспериментальных ядерных реакторов

в 56 странах. Они используются для изучения ядерных технологий, при медицинской диагностике и лечении рака. Свыше 200 ядерных реакторов позволяют плавать кораблям.

По данным МАГАТЭ к странам, в которых доля АЭС в общей выработке электроэнергии наиболее высока, относятся: Франция – 77,1 %; Литва – 77,7 %; Бельгия – 58 %; Словакия – 53,4 %; Украина – 46 %; Болгария – 41,6 %; Республика Корея – 39,3 % и др. В 16 странах с помощью АЭС удовлетворяется боле четверти потребностей в электроэнергии. Сегодня отмечается стабилизация установленных мощностей АЭС в Западной Европе и США и быстрый их рост в Азии (Япония, Китай, Тайвань, Южная Корея, Индия). Анализы, подтверждаемые заявленными намерениями ряда стран мира, показывают, что уже к середине века потребуется более чем пятикратное увеличение объемов ядерной энергетики в мире с дальнейшим ее наращиванием к концу века еще в 2–3 раза. Так, в 2020 году Индия планирует в 10 раз увеличить свои ядерные энергетические мощности, а Китай – в 6 раз. В республике Корея к 2015 году должны построить еще 8 ядерных энергоблоков общей мощностью 11,1 ГВт.

Сегодня многие страны готовы пересмотреть сроки вывода АЭС из эксплуатации в сторону увеличения, а в дальнейшем – и возобновить строительство АЭС.

Последние заявления нового руководства Германии, во главе с Ангелой Меркель, о возрождении атомной отрасли не вызвали беспокойства в обществе. С 1998 года (отказ Германии от АЭС) зафиксирован многократный рост цен на энергоресурсы и значительное отставание темпов развития возобновляемых источников энергии. По оценкам специалистов, замена существующих немецких АЭС на ТЭЦ и генерацию от ветра и солнца повлечёт рост себестоимости электроэнергии до 80 %, что нанесёт тяжёлый удар по экономике. Кроме того, резко ухудшится экологическая ситуация.

Повышение внимания ядерной энергетике уделяет и американская администрация Б. Обамы.

США в феврале 2006 г. объявили о намерении довести в последующие 40 лет мощность АЭС до 300 ГВт (за последнии 30 лет не было строительства).

Россия, как известно, является родиной ядерной энергетики: первая в мире АЭС была построена в Обнинске и запущена в эксплуатацию 27 июня 1954 г. Не «дожив» всего двух лет до своего полувекового юбилея, был заглушен реактор исторической АЭС. Это произошло 29 апреля 2002 г. по решению руководства бывшего Минатома России в связи с нерентабельностью дальнейшей ее эксплуатации. Согласно распространенной в те дни информации пресс-службы Минатома России, на первой в мире АЭС будет со временем создан музей.

Энергоблоки АЭС (по состоянию на 31.12.2006 г.), выработка электроэнергии и процентная доля атомной энергетики в общей выработке электроэнергии за 2006 г. (Источники: данные эксплуатационников, МАГАТЭ, pucnet)

Страна	В эксплуатации			Строятся			Производство ядерной энергии в 2006 г., 1E+06МВт·ч	Процентная доля в общей выработке электроэнергии
	Число	Мощность		Число	Мощность			
		Брутто, МВт эл.	Нетто, МВт эл.		Брутто, МВт эл.	Нетто, МВт эл.		
Аргентина	2	1005	935	–	–	–	6,9	7
Армения	1	408	376	–	–	–	2,4	42
Бельгия	7	6092	5801	–	–	–	44,3	54
Бразилия	2	2007	1901	–	–	–	13,8	3
Болгария	2	2000	1906	–	–	–	18,1	44
Китай	10	8074	7602	5	4534	4220	54,8	2
Германия	17	21366	20339	–	–	–	158,7	26
Финляндия	4	2800	2696	1	1720	1600	22,0	28
Франция	59	66160	63363	–	–	–	428,0	78
Великобритания	19	11902	10982	–	–	–	69,2	19
Индия	16	3800	3463	7	3380	3164	15,6	3
Иран	–	–	–	1	1000	953	–	–
Япония	56	49660	47843	2	2335	2237	291,5	30
Канада	18	13360	12596	–	–	–	92,4	16
Корея (Респ.)	20	18393	17454	4	4000	3800	141,2	39
Литва	1	1300	1185	–	–	–	8,7	70
Мексика	2	1366	1310	–	–	–	10,4	5
Нидерланды	1	515	485	. –	–	–	3,3	4

Страна	В эксплуатации			Строятся			Производство ядерной энергии в 2006 г., 1E+06МВт·ч	Процентная доля в общей выработке электроэнергии
	Число	Мощность		Число	Мощность			
		Брутто, МВт эл.	Нетто, МВт эл.		Брутто, МВт эл.	Нетто, МВт эл.		
Пакистан	2	462	425	1	300	280	2,5	3
Румыния	1	706	650	1	706	650	5,2	9
Россия	31	23242	21770	5	4800	4534	144,3	16
Швеция	10	9406	8976	–	–	–	65,0	48
Швейцария	5	3372	3220	–	–	–	26,3	37
Словакия	5	2200	2040	–	–	–	16,6	57
Словения	1	727-	696	–	–	–	5,3	40
Испания	8	7728	7446	–	–	–	57,4	20
Южная Африка	2	1888	1800	–	–	–	10,1	4
Тайвань	6	5144	4884	2	2712	2630	37,0	22
Чехия	6	3734	3500	–	–	–	24,5	32
Украина	15	13818	13090	–	–	–	84,8	48
Венгрия	4	1866	1755	–	–	–	12,5	38
США	104	104 787	99932	–	–	–	787,2	19
Итого:	437	389 488	370441	29	25467	24068	2660,0	–

С принятием в конце 2005 г. в промышленную эксплуатацию третьего энергоблока Калининской АЭС число действующих энергоблоков в стране достигло 31, а их установленная мощность составила 23242 МВт. В 2007 году доля АЭС в производстве электроэнергии в России составляет около 17 %.

Сегодня в стадии строительства в стране находится наибольшее в Европе число энергоблоков – 4. Согласно планам руководства, три из них должны вступить в строй до 2010 г. Это второй энергоблок Волгодонской АЭС, четвертый – Калининской и пятый – Балаковской АЭС.

В результате достройки 4-х энергоблоков нашему государству обеспечена экономия не менее 400 млрд кубометров газа. И даже по ценам внутреннего рынка экономия газа составит огромную сумму – более 5 млрд долл. С учетом того, что цена на внешнем рынке в пять и более раз выше, получается астрономическая цифра.

В 2006 г. атомные станции России выработали свыше 147,6 млрд кВт·ч электроэнергии, что составило 103,2 % от выработки за аналогичный период 2005 г.

Работа российских АЭС характеризуется как безопасная и надежная. Радиационный фон на самих АЭС и прилегающих территориях соответствовал показателям нормальной эксплуатации энергоблоков и не превышал естественных природных значений.

Производство энергии на АЭС обеспечивает экономию (замещение) до 40 млрд $м^3$ природного газа или 30 % от его потребления в электроэнергетике для производства электрической и тепловой энергии на ТЭС.

Премьер-министр РФ Владимир Путин поддержал опережающий рост атомной энергетики. Сделал он это в ходе своей ежегодной пресс-конференции в Кремле в присутствии боле 1000 журналистов российских и зарубежных СМИ, так что сигнал был подхвачен с максимально возможной скоростью. За первым анализом озвученных им цифр и задач большинство не увидело главного – впервые за всю новейшую историю глава государства высказался в поддержку развития атомной энергетики (до этого ни один представитель высшего руководства страны даже не пытался комментировать перспективы атомной отрасли). Публичная позиция премьер-министра на корню обрубила все домыслы и пересуды по этому поводу нужно строить новые атомные станции или нет. Ответ один – нужно.

Он поставил весьма жёсткие темпы её «разгона» – до 25 % в общем объёме генерации до 2030 года вместо сегодняшних 16 %. Это означает введение в строй, с учётом вывода атомных энергетических мощностей и в связи с окончанием сроков эксплуатации, до трёх энергоблоков мощностью в один гигаватт ежегодно. Напомним, что в советские времена в России лишь раз удалось ввести в строй три энергоблока в один год.

Действующие АЭС России

АЭС	Номер блока	Тип реактора	Электрическая мощность (брутто), МВт	Год ввода в эксплуатацию	Проектный год окончания эксплуатации
Белоярская	1	АМБ	100	1963	1980
	2	–	160	1967	1989
	3	БН-600	600	1980	2010
Билибинская	1	ЭГП	12	1974	2004
	2	–	12	1974	2004
	3	–	12	1975	2005
	4	–	12	1976	2006
Балаковская	1	ВВЭР-1000	1000	1985	2015
	2	–	1000	1987	2017
	3	–	1000	1988	2018
	4	–	1000	1993	2023
Калининская	1	–	1000	1984	2014
	2	–	1000	1986	2016
	3	–	1000	2004	–
Кольская	1	ВВЭР-440	440	1973	2003
	2	–	440	1974	2004
	3	–	440	1981	2011
	4	–	440	1984	2014
Курская	1	РБМК-1000	1000	1976	2006
	2	–	1000	1978	2008
	3	–	1000	1983	2013
	4	–	1000	1985	2015
Ленинградская	1	–	1000	1973	2003
	2	–	1000	1975	2005
	3	–	1000	1979	2009
	4	–	1000	1981	2011
Нововоронежская	1	В-1	210	1964	1984
	2	В-3	365	1969	1990
	3	ВВЭР-440	440	1971	2001
	4	–	440	1972	2002
	5	ВВЭР-1000	1000	1980	2010
Смоленская	1	РБМК-1000	1000	1982	2012
	2	–	1000	1985	2015
	3	–	1000	1990	2020
Волгодонская	1	ВВЭР-1000	1000	2001	–

Обязательная программа вводов на АЭС (всего 32130 МВт)
Блоки 880–1000 МВт

2009 г.	Волгодонская АЭС (2 бл.) – 1000 МВт
2010 г.	Курская АЭС (5 бл.)* – 1000 МВт
2011 г	Калиниская АЭС (2бл.) – 1000 МВт
2012 г.	Белоярская АЭС (2бл.) – 880 МВт
Итого:	3880 МВт

Блоки 1150 МВт

2012 г.	Нововоронежская АЭС-2 (1 бл.)
2013 г.	Ленинградская АЭС-2 (1 бл.)
	Нововоронежская АЭС-2 (2 бл.)
2014 г.	Волгодонская АЭС (3 бл.)
	Ленинградская АЭС-2 (2 бл.)
2015 г.	Ленинградская АЭС-2 (3 бл.)
	Тверская АЭС (1 бл.)
	Северская АЭС (1 бл.)
2016 г.	Волгодонская АЭС (4 бл.)
	Нижегородская АЭС (1 бл.)
	Южно-Уральская АЭС (1 бл.)
2017 г.	Тверская АЭС (2 бл.)
	Центральная АЭС (1 бл.)
	Северская АЭС (2 бл.)
2018 г.	Ленинградская АЭС-2 (4 бл.)
	Нижегородская АЭС (2 бл.)
	Южная-Уральская АЭС (2 бл.)
2019 г.	Тверская АЭС (3 бл.)
	Южная-Уральская АЭС (3 бл.)
	Центральная АЭС (2 бл.)
2020 г.	Нижегородская АЭС (3 бл.)
	Южная-Уральская АЭС (4 бл.)
	Тверская АЭС (4 бл.)
Итого:	26450 МВт

Необходимость «энергетического рывка» продиктована стремительно нарастающей остротой ситуации на мировом энергетическом рынке, связанной с истощением и существенным удорожанием газонефтяных инъекций в мировую экономику.

Немаловажную роль играет и увеличение населения планеты и ухудшение экологической обстановки.

В ядерно-энергетическом комплексе мы в состоянии удерживать конкурентоспособность еще некоторое время. Но если кардинально

не изменить ситуацию, то через 15–20 лет мы не сможем этого делать. Сегодня мы производим 16 % электроэнергии в стране, а к 2030 году, если ничего не менять, будем производить только 1,3 % с учетом выбытия существующих мощностей АЭС России. Если продлить срок эксплуатации всех наших станций на 10–15 лет, то мы будем производить 2 %, а если строить новые станции теми темпами, которыми мы строим сейчас, то к 2030 году будем производить 3,2 %. В общем, можно будет констатировать, что ядерной энергетики в России просто не станет.

Решение о развитии ядерной энергетики нельзя откладывать, т. е. у нас нет возможности, как в других отраслях, сказать: «Давайте мы лет двадцать не будем развивать ядерную энергетику, а потом, когда это все произойдет, мы ее быстренько разовьем и будем поддерживать соответствующий уровень». Такое решение невозможно. Или это решение принимается сейчас, или через двадцать лет мы не сможем развернуть этот процесс чисто технически в связи с потерей технологии, со сменой поколений специалистов, которые являются сегодня уникальными носителями знаний.

Данное учебное пособие несомненно окажется полезным для подготовки нового поколения специалистов для атомной отрасли.

Основная задача нейтронно-физического расчёта реактора состоит в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров реактора, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Выбрав и обосновав конструктивную схему реактора, необходимо далее провести оценочный тепловой расчёт, в результате которого определяются размеры активной зоны.

Главная искомая величина в физическом расчёте – коэффициент размножения. Для определения оптимального коэффициента размножения физико-нейтронный расчёт ведётся в нескольких вариантах. Расчётные варианты отличаются отношением объёмов ядерного горючего, замедлителя, теплоносителя и конструкционных материалов. Оптимизация решётки, физический расчёт в рамках двухгруппового приближения диффузионно-возрастной теории, расчёт системы регулирования должны бить выполнены с использованием вычислительной техники.

Далее рассчитываются характеристики «горячего» реактора, определяется температурный коэффициент реактивности. Для расчёта двухгрупповых параметров реактора необходимо предварительно рассчитать спектры нейтронов и их ценности в активной зоне в 26-групповом диффузионном приближении. В двухгрупповом диффузионном приближении уточняется величина эффективного коэффициента размножения, рассчитываются распределения нейтронных потоков по радиусу и высоте реактора и эффективность системы регулирующих стержней. По из-

вестному полному запасу реактивности и компенсирующей способности одного стержня, расположенного в центре реактора, оценивается необходимое количество стержней управления и их местоположение в активной зоне. Физический расчёт заканчивается определением изменения концентрации делящихся изотопов, расчётом отравления, шлакования и коэффициента воспроизводства.

После этого выполняется теплогидравлический расчёт. В его ходе определяется тепловое и термонапряжённое состояние основных элементов конструкции технологического канала (тепловыделяющей сборки), тепловое и гидравлическое состояние теплоносителя, тепловое и термонапряжённое состояние органов регулирования по высоте активной зоны в наиболее энергонапряжённой ячейке её поперечного сечения. В заключение проводится расчёт активности теплоносителя и расчёт биологической защиты.

Авторы выражают глубокую благодарность доценту Ю.В. Данейкину и ассистенту кафедры физико-энергетических установок Д.С. Исаченко за помощь при подготовке главы 4.

I. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РЕАКТОРА И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Варианты реакторов включают как водо-водяные реакторы, так и реакторы с графитовым замедлителем.

Кратко рассмотрим их основные особенности, достоинства и недостатки (2, 3, 15, 18, 19, 20, 30, 32, 35, 36).

1.1. Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР)

ВВЭР имеет следующие важные достоинства:

1) доступность и отработанность технологии воды;
2) большие удельная и объёмная мощности при относительно небольших габаритах и умеренных критических загрузках реактора;
3) возможность применения одноконтурной схемы с подачей пара теплоносителя первого контура в силовую установку;
4) высокая замедляющая способность воды в сочетании со слабым рассеянием нейтронов водородом при больших энергиях позволяет обеспечить глубокое выгорание при умеренных обогащениях топлива;
5) высокая степень внутренней устойчивости благодаря отрицательному плотностному коэффициенту реактивности.

Вместе с тем ВВЭР обладают известными недостатками, присущими воде:

1) большое сечение поглощения нейтронов, что приводит к использованию обогащенного топлива;
2) высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
3) коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы.
4) ограничение тепловых потоков кризисом теплосъёма.

Приведём краткое описание активной зоны корпусного водо-водяного реактора с водой под давлением (ВВЭР-440, ВВЭР-1000).

В настоящее время таких реакторов построено и находится в эксплуатации довольно большое количество. Все узлы реактора находятся внутри прочного корпуса, представляющего собой вертикальный тол-

стостенный сосуд с днищем, сверху закрываемый объёмной крышкой. В верхней части боковой цилиндрической поверхности корпуса расположены патрубки для подвода и отвода теплоносителя. Для опоры и дистанционирования топливных кассет, а также для организации потока теплоносителя внутри корпуса реактора служит корзина активной зоны, обычно представляющая собой обечайку, в которой в нижней части крепится опорная плита, а в верхней – устройство для дистанционирования топливных кассет. Активная зона реактора собрана из стержней, объединённых в шестигранные кассеты. Стержни омываются снаружи обычной водой под давлением. Диаметр твэла – 0,65 см, материал покрытия – цирконий с добавкой 1 % ниобия. Число твэлов в кассете – 91, 120, 126. В кассете элементы образуют треугольную решетку с шагом 14,3 мм. Размер кассеты под ключ – 144 мм. Толщина стенки кассеты – 1,5÷2 мм. Материал стенки кассеты – цирконий с добавкой 2,5 % ниобия. Расстояние между центрами кассет – 147 мм, между кассетами имеется щель размером 3 мм. Число рабочих кассет и кассет СУЗ в активной зоне – 349. На рис. 1.1. представлены топливная кассета и твэл ВВЭР-440 Ново-Воронежской АЭС.

Активная зона ВВЭР-1000 существенно превышает размеры активной зоны для ВВЭР-440 и состоит из шестигранных кассет. Основные параметры активной зоны, кассет и твэлов:

Эффективный радиус активной зоны	156 см
Высота активной зоны	355 см
Объём активной зоны	27,0 $м^3$
Отношение площади замедлителя к площади топлива	2,00
Размер кассеты под ключ	238 мм
Шаг расположения кассет	241 мм
Толщина стенки кассет	1,5 мм
Высота кассеты	4665 мм
Число твэлов в кассете	317 шт.
Шаг размещения твэлов	12,76 мм
Размеры оболочки твэлов	9,1 × 0,65 мм
Материал оболочки твэлов	цирконий с добавкой 1 % ниобия
Диаметр топливной таблетки	7,53 мм
Диаметр осевого отверстия в топливной таблетке	1,4 мм
Масса загрузки UO_2 в одном твэле	1565 г
Количество ПЭЛ (СВП) в кассете	18 шт.

Активная зона состоит из 61 регулируемой и 102 нерегулируемых кассет, из них при трёхгодичной кампании с пучками стержней

выгорающего поглотителя (СВП) 54 кассеты. Регулируемая кассета содержит тепловыделяющую сборку (ТВС) и пучок поглощающих элементов (ПЭЛ).

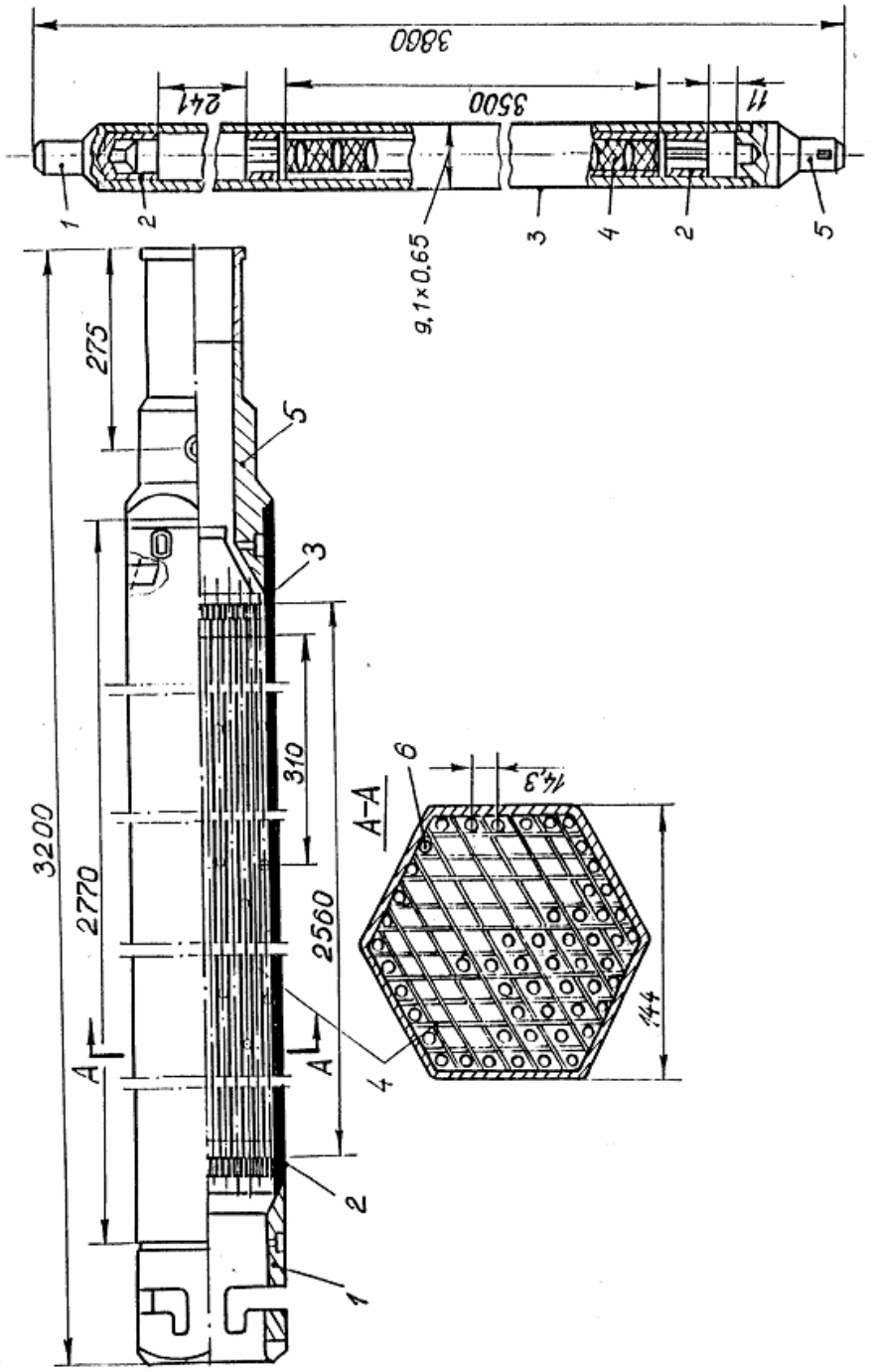


Рис. 1.1. Топливная кассета и твэл ВВЭР-1000.
Кассета (1 – головка, 2 – чехол, 3 – концевая решетка,
4 – дистанционирующая решетка, 5 – хвостовик, 6 – твэлы),
твэл (1 – наконечник, 2 – разрезная втулка, 3 – оболочка,
4 – топливная таблетка, 5 – нижняя заглушка)

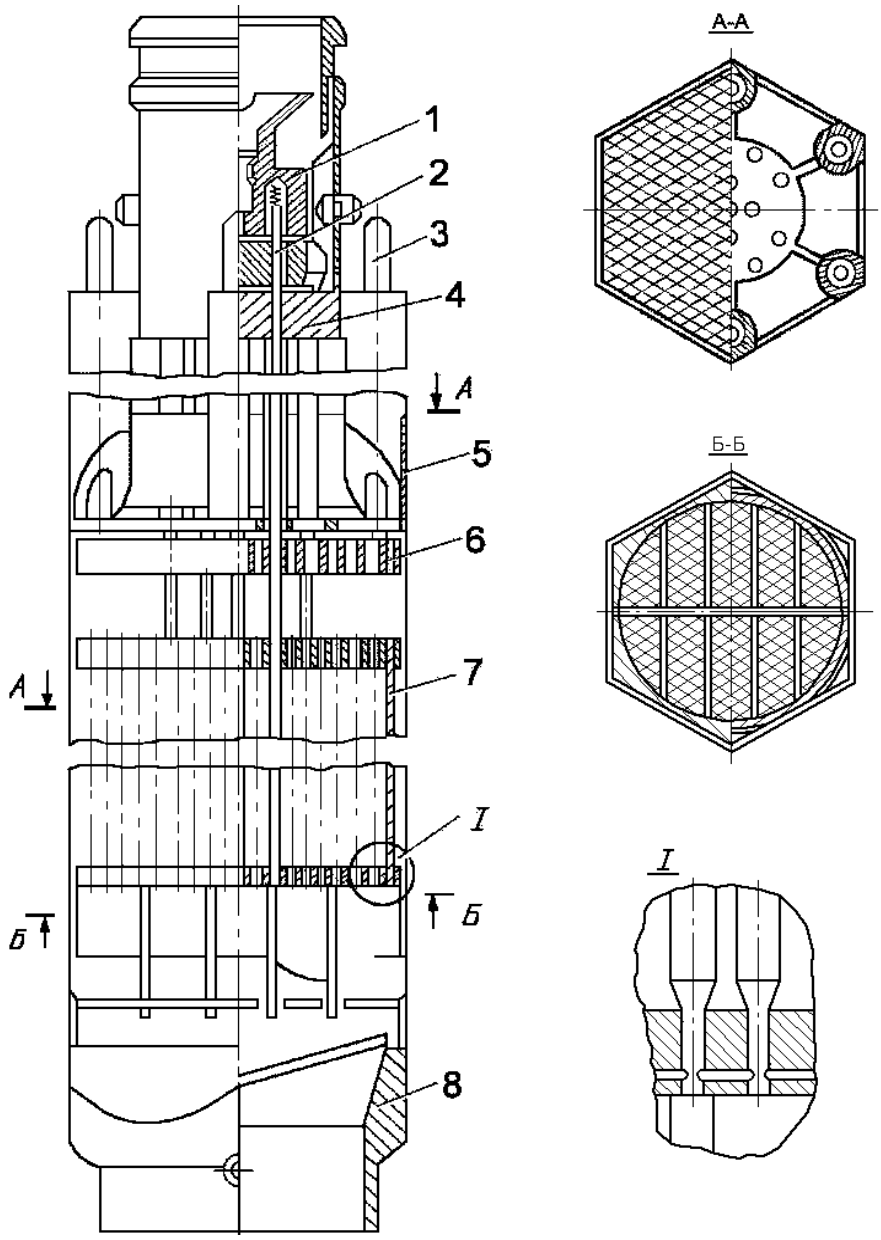


Рис. 1.2. Чехловая ТВС ВВЭР-1000 (V блок НВАЭС)
1 – траверса регулирующих стержней; 2 – пэл;
3 – подпружинные штыри; 4 – головка ТВС;
5 – шестигранный перфорированный чехол;
6 – дистанционирующая решетка; 7 – твэл; 8 – хвостовик ТВС

Активная зона реактора АСТ набрана из 121 ТВС по треугольной сетке с шагом 243 мм. ТВС содержит пучок твэлов, заключённых в шестигранный чехол из сплава циркония размером «под ключ» 238 мм и толщиной 1,5 мм. Твэл выполнен из трубки размером 13,6×0,9 мм из циркониевого сплава и заполненной таблетками из спеченного диоксида урана. Твэлы в ТВС расположены в узлах правильной треугольной решетки с шагом 17,8 мм.

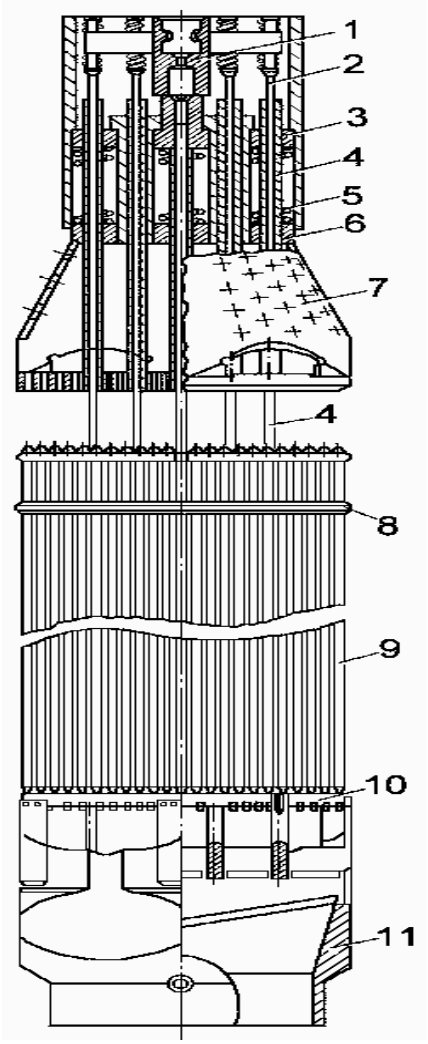


Рис. 1.3. Безчехловая ТВС ВВЭР
1 – траверса регулирующих стержней; 2 – пэл; 3 – подвижная часть головки; 4 – направляющая труба пэлов; 5 – пружина; 6 – неподвижная часть головки; 7 – отверстия для прохода теплоносителя; 8 – дистанционирующая решетка; 9 – твэл; 10 – опорная нижняя решетка; 11 – хвостовик

Характеристики ТВС ВВЭР-1000

Размер ТВС «под ключ», мм	238
Шаг расположения ТВС, мм	241
Толщина стенки ТВС, мм	1,5 (с перфорацией 25 % поверхности)
Высота ТВС с пучком регулирующих стержней и СВП, мм	4655
Число твэлов в ТВС	312
Шаг размещения твэлов, мм	12,76
Число направляющих каналов для стержней регулирования	18
Число каналов для датчиков замера энерговыделений	1
Размеры направляющих каналов и канала для датчика замера энерговыделений, мм	12,6 × 0,85
Размеры центральной трубки, мм	10,3 × 0,65

Для частичной компенсации запаса реактивности на выгорание и для профилирования энерговыделения по высоте активной зоны в ТВС вместо шести твэлов устанавливают поглощающие элементы. Активная зона рассчитана на работу в режиме частичных перегрузок с интервалом между ними два года. В первой загрузке используют топливо с обогащением урана 1,0; 1,6; 2,0 %.

1.2. Реакторы с графитовым замедлителем

Так как графит имеет очень низкое сечение поглощения нейтронов, химически довольно инертен, термостоек, обладает высокой теплопроводностью, то при проектировании и эксплуатации реакторов с графитовым замедлителем возникает ряд следующих особенностей:

1. Возможность использования в сочетании с графитом различных теплоносителей, в том числе высокотемпературных.
2. Более высокие коэффициенты воспроизводства, чем в ВВЭР.
3. Функционирование системы с перегрузкой работающего реактора.
4. Использование природного урана в сочетании с газовым теплоносителем сводит к минимуму количество конструкционных материалов в активной зоне.
5. Благодаря высокой температуростойкости и теплопроводности всё выделяющееся в графите тепло (до 85 % передаётся в теплоноситель, в результате отпадает необходимость отдельного охлаждения графита.

С другой стороны, реакторы с графитовым замедлителем обладают определёнными недостатками:

1. Относительно малая замедляющая способность и большая длина замедления приводит к большим размерам и соответственно низкой плотности теплосъёма активной зоны.
2. Длительные радиационные воздействия приводят не только к изменению физико-механических свойств и размеров графита, но и сопровождаются значительным накоплением внутренней энергии.
3. Пористость графита приводит к тому, что теплоноситель проникает в него, что вызывает изменение реактивности.

Следует отметить следующие наиболее часто встречающиеся группы графитовых реакторов:

1. Двухцелевые газо-графитовые корпусные реакторы (ГГР).
2. Промышленные низкотемпературные графитовые реакторы для производства плутония.

Горючее – природный металлический уран в виде блочков, покрытых оболочкой из сплавов на основе алюминия.

Охлаждение осуществляется газом или водой.

3. Энергетические канальные реакторы с водяным теплоносителем на слабообогащенном металлическом или двуокисном топливе с покрытием из нержавеющей стали или сплавов на основе циркония или алюминия.
4. Энергетические реакторы с жидкометаллическим (натриевым) теплоносителем на обогащенном уране с нержавеющими или циркониевыми покрытиями. При этом графит должен быть огражден от проникновения натрия.

Газо-графитовые реакторы получили наибольшее распространение в Англии и Франции. Достоинства и недостатки этих реакторов связаны с особенностями газового теплоносителя:

1. Возможность получения высоких температур теплоносителя, независимо от величины его давления, пара высоких стандартных параметров и высокого КПД.
2. Так как газовый теплоноситель слабо взаимодействует с материалами активной зоны, то отпадает необходимость в герметичных металлических каналах, отделяющих топливо с теплоносителем от замедлителя. В связи с этим захват нейтронов конструкционными материалами значительно уменьшается.
3. Инерционность и сравнительно небольшая радиоактивность газа, отрицательный температурный коэффициент реактивности упрощают управление и снижают потенциальную опасность большой аварии.

С другой стороны, для ГГР специфичны определённые трудности, связанные с малыми удельной теплоёмкостью и коэффициентом теплоотдачи твэлов, что приводит к необходимости увеличивать поверхность теплоотдачи твэлов, затраты мощности на циркуляцию и давление газа. Энергетические реакторы с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем по конструкции отличаются от ГГР. Так как вода не должна контактировать с графитом, то давление теплоносителя несут технологические каналы.

Графитовые реакторы с натриевым охлаждением привлекли к себе внимание в силу известных достоинств жидкометаллических теплоносителей. Они имеют высокую температуру кипения при низком давлении, обладают хорошими теплопередающими свойствами, имеют достаточно высокую тепловую и радиационную устойчивость, сравнительно слабое воздействие на конструкционные материалы.

К недостаткам можно отнести необходимость в дополнительных устройствах для поддержания теплоносителя в жидком состоянии. При соприкосновении графита с натрием последний легко проникает в поры, что приводит к резкому уменьшению его замедляющих свойств. В результате графитовую кладку необходимо заключать в тонкую герметизирующую

оболочку, либо применять каналы специальной конструкции с двухходовым движением теплоносителя. В первом случае реактор представляет собой металлический сосуд, заполненный жидким натрием. Под уровнем натрия размещается графитовая кладка или отдельные модули кладки в защитной оболочке с каналами, в которых размещаются топливные сборки. Чтобы снизить поглощение нейтронов в конструкционных материалах, стремятся уменьшить число модулей кладки, что неизбежно ведёт к укрупнению топливных сборок. Вес их может достичь 600 кг.

Опасность воспламенения на воздухе и взрывоопасность при контакте с водой требуют применения инертной атмосферы над уровнем жидкометаллического теплоносителя и специальных мер предотвращения его контакта с водой.

Ещё одним недостатком жидкометаллического теплоносителя (Na, Ka) является его высокая и медленно спадающая наведённая радиоактивность. Чтобы предотвратить выброс этой радиоактивности, используют промежуточный контур с с нерадиоактивным натрием или калием.

Кроме натрия, можно использовать эвтектические сплавы 56 % Na и 44 % K (температура плавления 292 K), и 77,2 % K и 22,8 % Na (температура плавления 284,5 K).

В качестве примера приведём краткое описание основных элементов активной зоны наиболее распространённых типов реакторов.

Уран-графитовые реакторы с водяным теплоносителем

Реактор РБМК представляет собой графитовую кладку, заключённую в кожух и опирающуюся на сварные металлоконструкции, которые вместе с кожухом образуют герметическую полость, заполненную смесью гелия и азота. Кладка состоит из отдельных колонн, собранных из графитовых блоков с цилиндрическими отверстиями. В отверстиях колонн установлено 1700 топливных каналов, которые проходят через трубчатые тракты, вваренные в верхнюю и нижнюю металлоконструкции реактора. Центральная часть каналов (труба наружным диаметром 88 мм с толщиной стенки 4 мм) выполнена из сплава Zr + 2,5 % Nb, а верхняя и нижняя части – из нержавеющей стали. На центральную часть канала для отвода тепла из кладки к теплоносителю надеты графитовые кольца, выполненные таким образом, что половина из них плотно насажена по наружному диаметру канала, а другая половина при загрузке канала плотно садится в отверстие графитовой кладки. Кольца обоих типов чередуются. В топливные каналы через верхние отверстия загружаются и уплотняются в них кассеты с двумя ТВС. Каждая ТВС состоит из 18 твэлов стержневого типа, представляющих собой трубку из циркониевого сплава (Zr. + 1 % Nb), заполненную таблетками из двуокиси урана. Твэлы дистанционируются от-

носительно друг друга в дистанционирующих решетках, представляющих собой набор индивидуальных ячеек, заключённых в общий обод и сваренных между собой контактной сваркой (рис. 1.4, 1.5.).

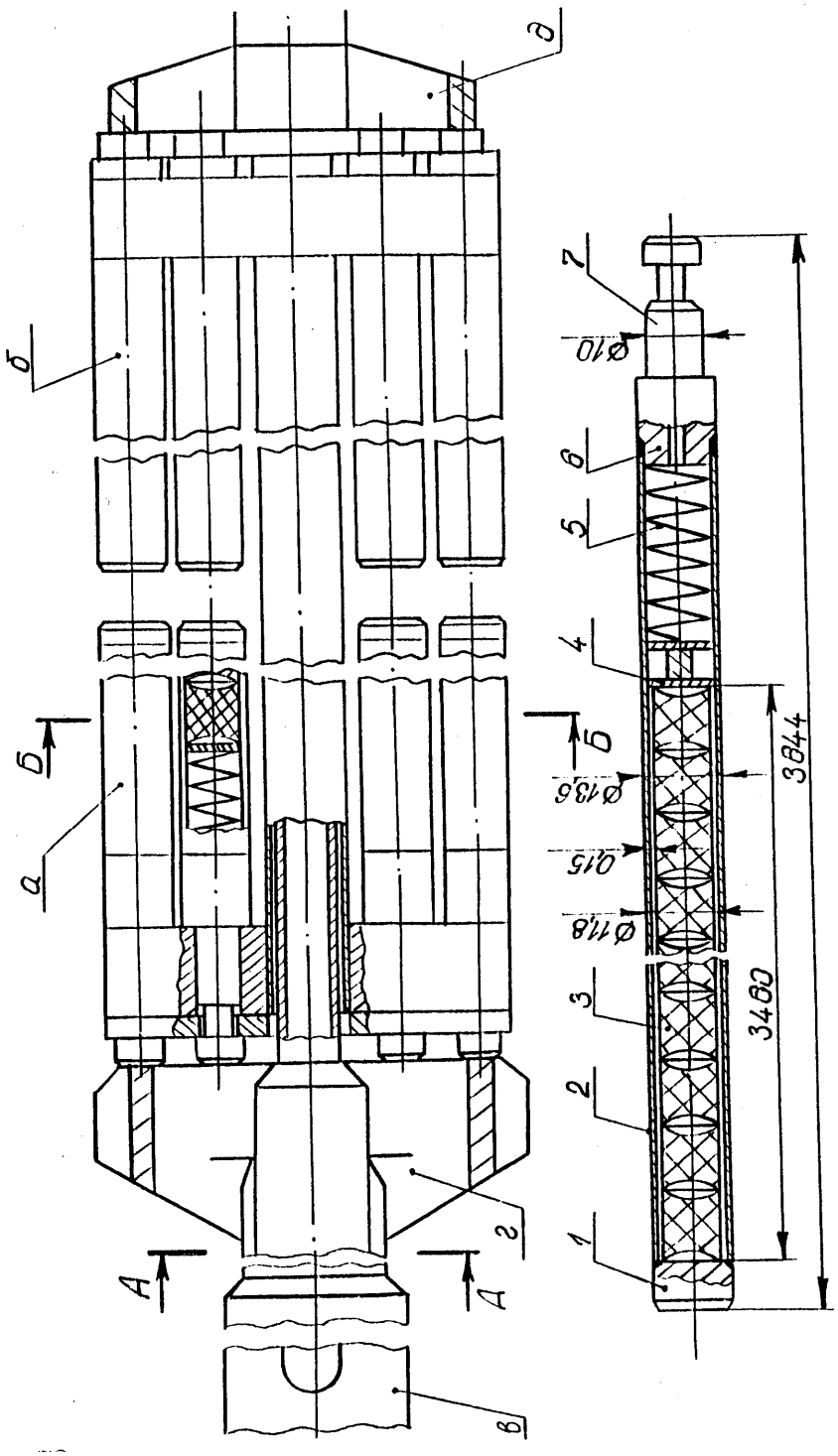


Рис. 1.4. Кассета и твэл РБМК-1000;
1 – пробка, 2 – оболочка, 3 – топливная таблетка,
4 – шайба прижима, 5 – втулка, 7 – наконечник

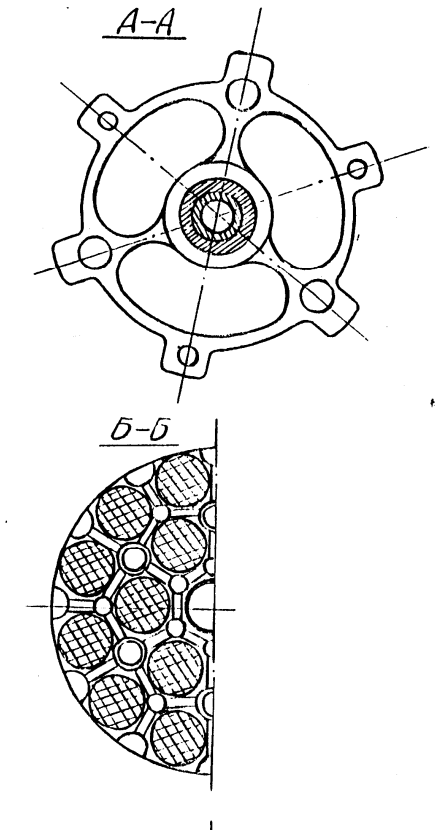


Рис. 1.5. Сечение кассеты РБМК-1000

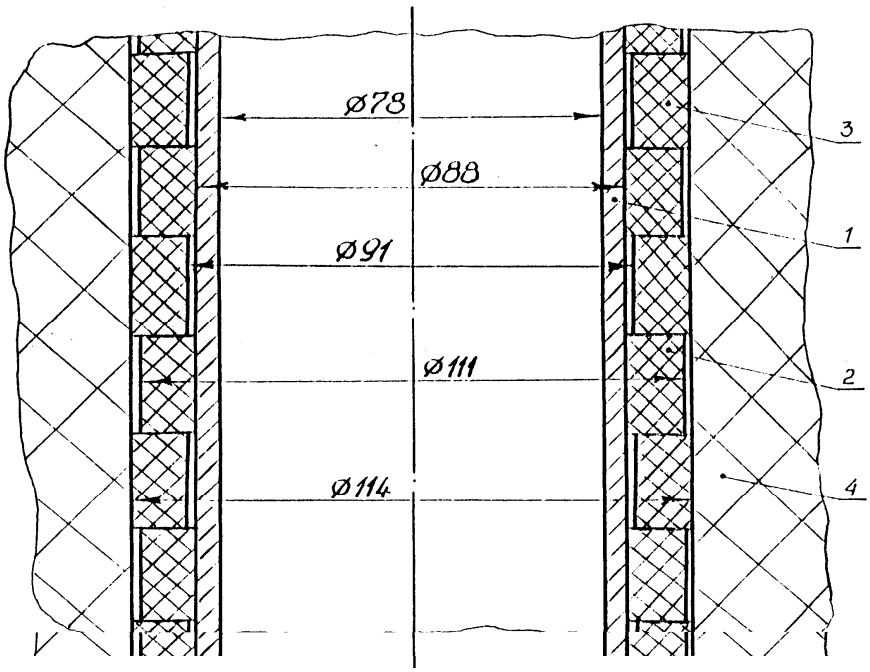


Рис. 1.6. Установка технологического канала в графитовой кладке:
1 – труба сплав I25; 2 – графитовое кольцо внутреннее;
3 – графитовое кольцо внешнее; 4 – графитовая кладка

Длина ТВС	3654 мм
Длина твэл	3642 мм
Диаметр внутренней оболочки твэл	11,7 мм
Диаметр ТВС	79 мм
Высота таблетки	13 мм
Диаметр наружной оболочки твэл	13,6 мм
Диаметр табл.	11,52 мм

Установка ТК в графитовой кладке (рис. 1.6).

Газо-графитовые реакторы

С конца пятидесятых годов усиленно развиваются усовершенствованные ГГР типа AGR и высокотемпературные типа HTGR. Первые используют пучки твэлов, подобные твэлам ВВЭР из слегка обогащенной двуокиси урана, в нержавеющей трубке, вторые требуют разработки полностью керамических твэлов.

В английских AGR выбраны пучки из 36 твэлов диаметром 15 мм в нержавеющих оболочках толщиной 0,4 мм, размещенных в каналах диаметром 220 мм (без графитовой втулки диаметр топливной кассеты 180 мм), которые расположены с шагом около 400 мм. На рис. 1.7 представлена конструкция кассет усовершенствованных ГГР.

Одним из реакторов нового поколения, удовлетворяющих требованиям развивающейся широкомасштабной атомной энергетики, является ГТ-МГР. Энергетическая установка ГТ-МГР состоит из 2-х блоков: модульного высокотемпературного реактора (МГР), тепловой мощностью 600 МВт, и газотурбинного преобразователя прямого цикла (ГТ). В основе концепции МГР лежит использование активной зоны с графитовым замедлителем, топливом в виде микросфер с многослойными керамическими покрытиями и гелием в качестве теплоносителя. В активной зоне полностью отсутствуют металлоконструкции, это позволяет иметь температуру гелия на выходе из реактора 850 °С и более.

Активная зона реактора в поперечном сечении представляет собой кольцо 6-гранной формы. Топливные блоки представляют собой 6-гранную графитовую призму, с топливосодержащими элементами, размещёнными в отверстиях блока. В блоках выполнены также отверстия для загрузки выгорающего поглотителя и прохода гелия. Активная зона содержит 102 топливные колонны, состоящие по высоте из 10 блоков каждая. Отражатель представляет собой конструкцию, набранную из графитовых блоков различной конфигурации. Он включает в себя верхний, нижний, боковой и центральный отражатели и нижнюю сборную камеру для выходящего из активной зоны гелия.

Внутренний эквивалентный диаметр активной зоны 2,96 м

Внешний эквивалентный диаметр	4,84 м
Высота активной зоны	8 м
Средняя удельная энергонапряженность	6,6 МВт/м^3
Размер топливного блока, под ключ	38 см

Каждый топливный блок содержит 198 топливных элементов стержневого типа диаметром 1,26 см и высотой 79,2 см, каждый топливный элемент содержит 35300 микротвэлов (топливная частица с четырехслойным противоосколочным покрытием на основе диоксида урана).

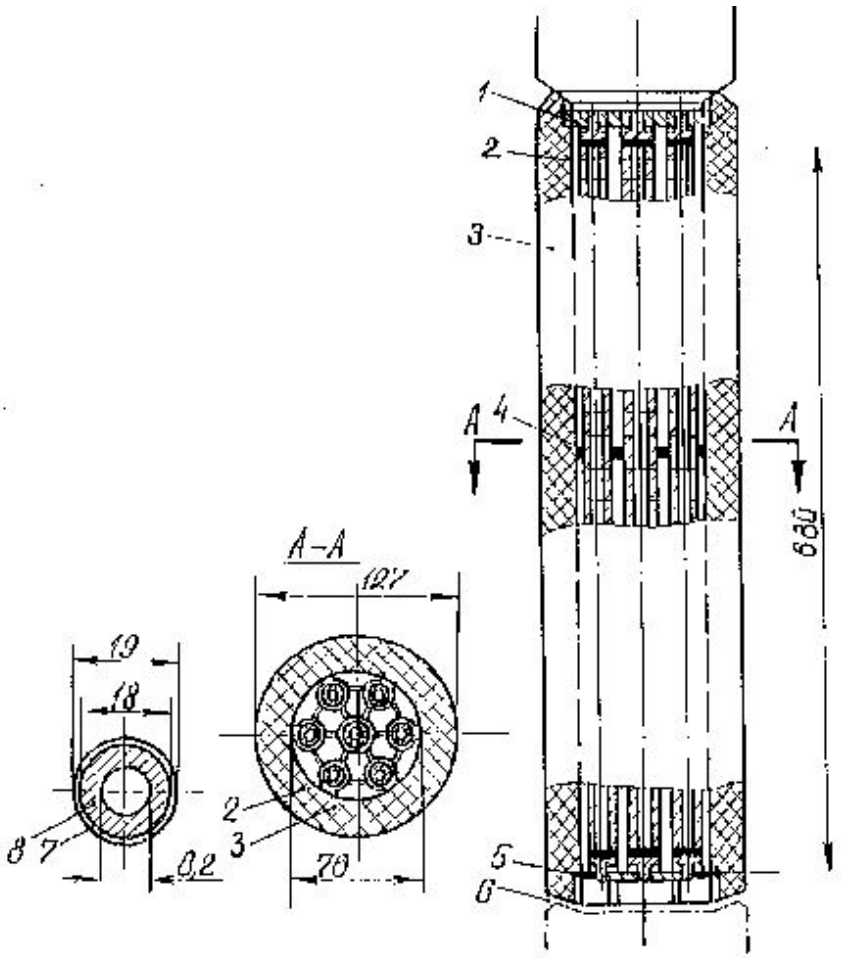


Рис. 1.7. Топливная сборка AGR:
1 – решетка для подвески твэл; 2 – твэл; 3 – графитовая опорная втулка; 4 – средняя дистанционирующая решетка; 5 – нижняя дистанционирующая решетка; 6 – стык с соседним пучком; 7 – оболочка; 8 – таблетки UO_2

Микротвэл имеет следующие параметры:
диаметр керна (UO_2) 0,05 см; γUO_2 10,5 г/см^3;
диаметр микротвэла с покрытиями 0,106 см;
толщина покрытий и плотности:
1 слой – РуС δ_1 = 0,09 мм γ_1 = 1,1 г/см^3

2 слой – PyC δ_2=0,07 мм γ_2=1,8 г/см^3
3 слой – SiC δ_3=0,06 мм γ_3=3,2 г/см^3
3 слой – PyC δ_4=0,06 мм γ_3=1,8 г/см^3

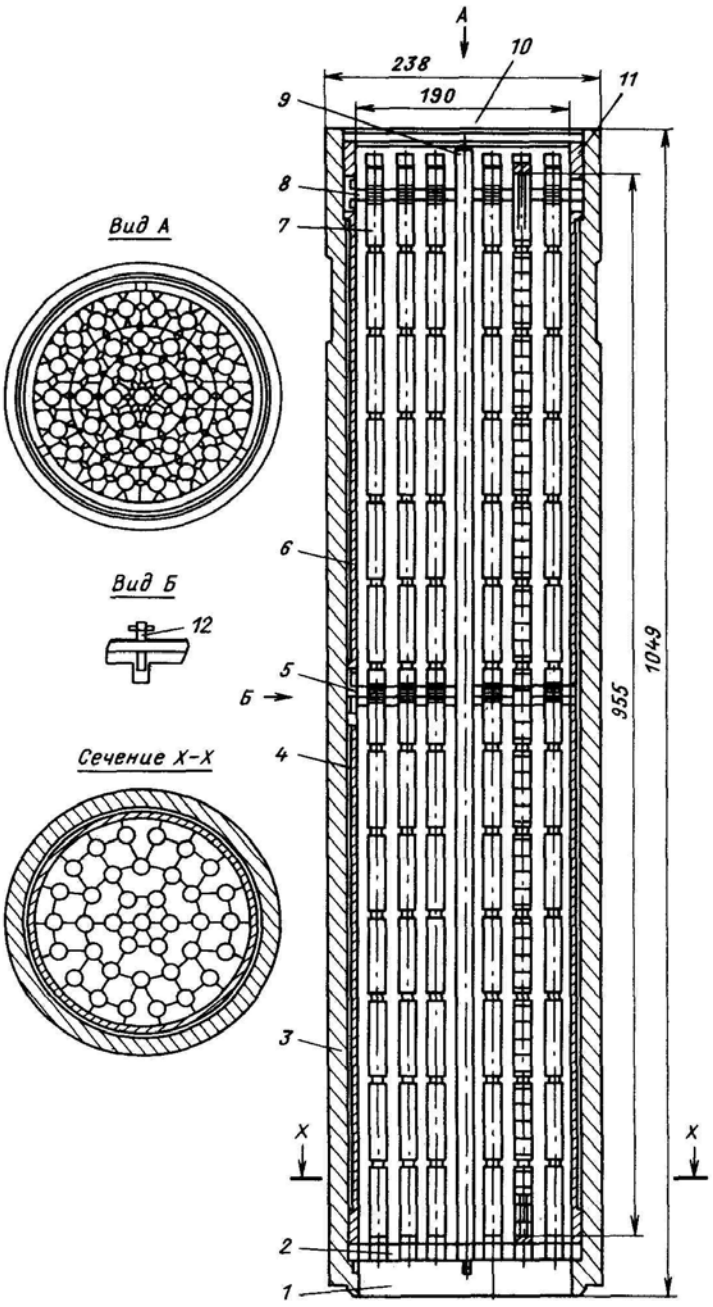


Рис. 1.8. Сборка твэлов для реакторов AGR:
1 – нижний торец; 2 – нижняя решетка; 3 – внешняя графитовая трубка;
4 – нижняя графитовая трубка; 5 – центральная решетка;
6 – верхняя графитовая трубка; 7 – твэл; 8 – верхняя решетка;
9 – направляющая трубка; 10 – верхний торец;
11 – закрепительное кольцо; 12 – деталь закрепления

Основные характеристики некоторых газоохлаждаемых реакторов (теплоноситель – углекислый газ)

Характеристика	«Колдер-Холл»	«Уилфа»	«Хинкли-Пойнт-Б»	«Хей-шем»
Тип реактора	Магноксовый		AGR	
Год пуска	1956	1971	1976	1980
Электрическая мощность, МВт	45	590	665	666
КПД, %	19	31,5	41,2	41,7
Давление CO_2, МПа	0,78	2,75	4,13	4,13
Температура CO_2 на выходе из реактора, °С	340	414	645	651
Топливо	Металлический уран		UO_2	
Обогащение, %	Природный уран		2,06–2,57	2,1–2,6
Тип твэла	Блочковый		Стержневой	
Энергонапряжённость топлива, кВт/кг	1,35	3,16	–	–
Расчётное выгорание, МВт·сут/т U	$(3\div4)\cdot10^3$	$3{,}5\cdot10^3$	18000	18000
Размеры активной зоны *D/H*, м	9,45/6,4	17,37/9,14	–	–
Масса графита, т	650	3740	–	–
Число рабочих каналов	1696	6150	–	–
Число твэлов в канале	6	8	8	8
Материал корпуса	Сталь	ПНЖБ	ПНЖБ	ПНЖБ

Обогащение по урану-235 в топливных частицах составляет ~20 %. Загрузка урана на топливный блок 4,25 кг.

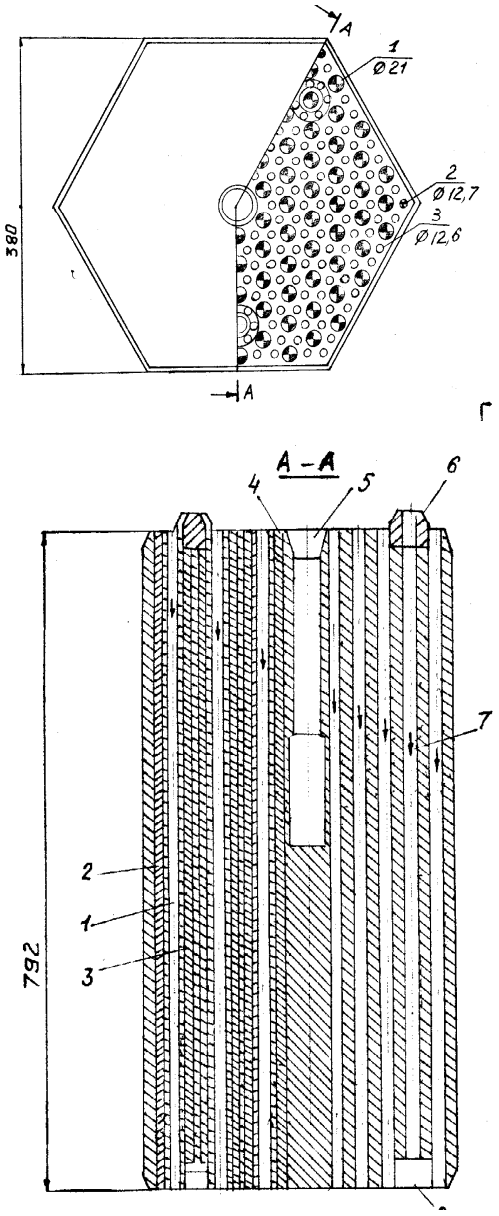
Плотность графита матрицы элемента и топливного блока составляет ~ 1,7 г/см^3.

Загрузка выгорающего поглотителя в количестве 6 стержней, диаметром 1,27 см, расположенных в углах шестигранного топливного блока, равна 2,5 г.

Проведённые расчётные исследования показали, что оптимальным соотношением ядер замедлителя к ядрам урана является $\rho_c / \rho_u \approx 600$. Исходя из этого, считается, что в топливном блоке имеется 66 каналов для прохода теплоносителя диаметром 2,1 см. Температура теплоносителя на входе в АЗ 490 °С, на выходе – 850 °С.

Кампания топлива в активной зоне составляет 1080 эфф. суток.

На рис. 1.9а и 1.9б представлены микротопливо и тепловыделяющая сборка реактора ГТ-МГР.



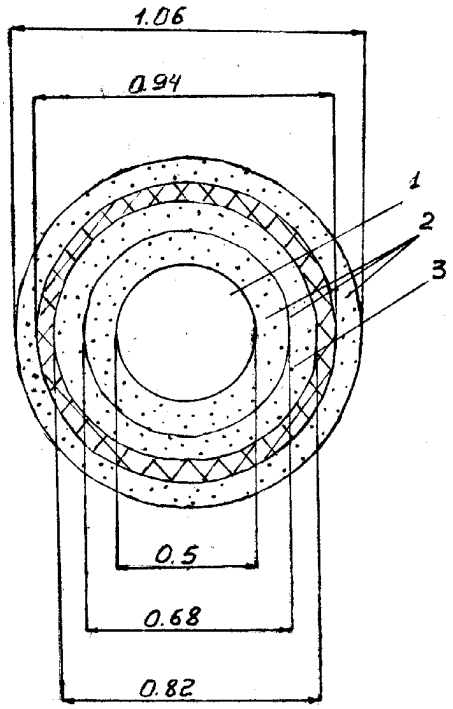


Рис. 1.9б. Микротопливо:
1 – топливо; 2 – слои пиролитического углерода;
3 – слои карбида кремния

Рис. 1.9а. Тепловыделяющая сборка HTGR:
1 – канал для теплоносителя; 2 – канал для выгорающего поглатителя;
3 – топливный канал; 4 – канал для управляющего стержня;
5 – зажим штифт; 6 – центрующий штифт;
7 – поток He; 8 – центрующее отверстие

Реактор с жидкометаллическим теплоносителем (SGR)

Активная зона реактора состоит из 233 ячеек или модулей шестигранной формы. Ячейка реактора состоит из графитового замедлителя и центральной трубки рабочего канала с внутренним диаметром 80,8 мм (рис. 1.10). Внутри трубки располагаются сборки тепловыделяющих элементов. Каждая сборка включает 19 элементов стержневого типа. Тепловыделяющий элемент состоит из 10 топливных блоков малообогащенного

металлического урана диаметром 11,56 мм и длиной 304,8 мм. Обогащение ядерного горючего изотопом U^{235} составляет 1,8 %. Стержень ядерного горючего покрыт защитной оболочкой из нержавеющей стали толщиной 0,254 мм. Хороший тепловой контакт между сердечником и оболочкой достигается посредством заполнения зазора толщиной 0,25 мм жидким натрием. Модули представляют собой шестигранные графитовые призмы, заключённые в герметизированные циркониевые оболочки толщиной 0,89 мм для предотвращения попадания теплоносителя в графит. Между модулями имеется зазор 2,54 мм. Через зазоры пропускается часть натриевого теплоносителя для отвода тепла от графита.

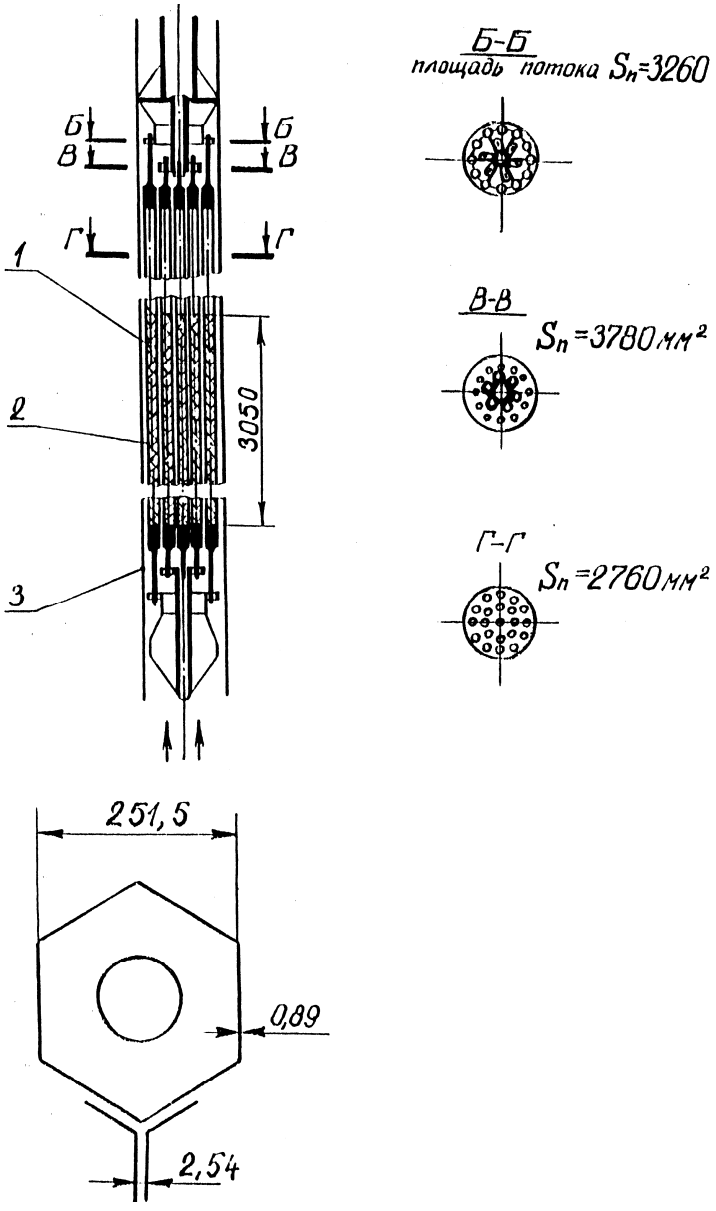


Рис. 1.10. Реактор с натриевым теплоносителем:
1 – ядерное горючее; 2 – оболочка; 3 – труба рабочего канала

1.3. Тепловыделяющие элементы реакторов

Твэлы и ТВС – наиболее ответственные элементы энергетического реактора. Конструкция и материалы твэлов и ТВС должны обеспечивать их надёжную работу при высоких плотностях энерговыделения и при больших глубинах выгорания твэлы также выполняют функции барьеров безопасности, предотвращающих выход высокоактивных продуктов деления в теплоноситель.

При выборе конструкции твэла и его размеров необходимо учитывать следующие соображения:

1) чем больше отношение поверхности к объёму, тем меньше напряжённость единицы поверхности твэла;
2) с возрастанием отношения поверхности к объёму твэла уменьшаются размеры активной зоны, но одновременно возрастает доля конструкционных материалов, снижаются прочностные и вибрационные характеристики твэлов;
3) поперечные размеры твэлов должны уменьшаться с увеличением температуры теплоносителя и тепловых потоков, а также с уменьшением теплопроводности топлива;
4) конструкция и размеры твэлов существенно влияют на параметры размножающей среды и загрузку топлива в реактор.

Выбор типа твэла и его размеров целесообразно проводить по прототипам.

Существует достаточно большое количество конструктивных форм твэлов. В зависимости от геометрической формы различают твэлы блочковые, стержневые, кольцевые, трубчатые, пластинчатые, ленточные, шаровые, призматические. Чаще всего применяются твэлы стержневой и трубчатой формы (реже пластинчатые) в оболочках из сплавов на основе алюминия, железа, циркония, а высокотемпературные твэлы – в керамической оболочке.

Обычно твэл состоит из топливного сердечника, оболочки, отделяющей сердечник от теплоносителя и замедлителя, и концевых деталей, герметизирующих полость сердечника. Внутри оболочки предусматривают свободные объёмы для компенсации разности термических расширений сердечника и оболочки и для сбора газообразных продуктов деления. Зазор между оболочкой и топливом обычно существует в твэлах с керамическим топливом. Он необходим по условиям технологии изготовления, а также для предотвращения взаимодействия между сердечником и оболочкой в результате их термического расширения. В случае металлического урана этот зазор необходим ещё для компенсации увеличения объёма при работе. Обычно зазор не превышает 0,05÷0,2 мм.

Для улучшения теплопередачи зазор заполняют газами или жидкими металлами. Как правило, в ВВЭР широко используют заполнение после вакуумирования внутренних полостей твэлов гелием при атмосферном или несколько большем давлении. В твэлах с дисперсионным сердечником зазоры обычно отсутствуют. Кроме радиального зазора, необходимо предусмотреть газовые полости, в которых накапливаются газообразные продукты деления (в основном, атомы ксенона и криптона). Эти полости могут быть выполнены в виде осевого зазора, расположенного на конце твэла (за пределами активной зоны), или в виде отверстия по центру сердечника, распределенного по длине, либо в форме углублений на стыках таблеток, из которых состоит сердечник.

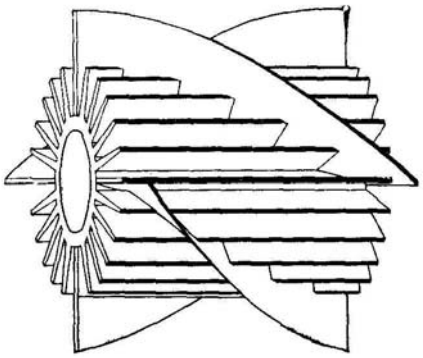


Рис. 1.11. Многозонный тепловыделяющий элемент; продольное оребрение с винтообразными платинами

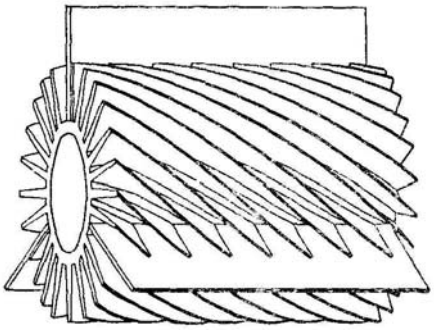


Рис. 1.12. Многозонный тепловыделяющий элемент; винтовое оребрение с прямыми платинами

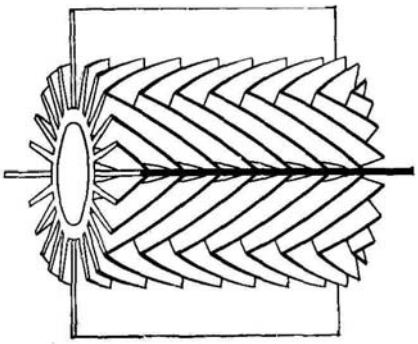


Рис. 1.13. Трубчатый твэл с односторонним охлаждением для реактора EDF-3,4. Оболочка с шевронными плоскими ребрами и центрирующими деталями; сердечник из сплава U – 1,1 % Mo в виде трубы 43×23 мм

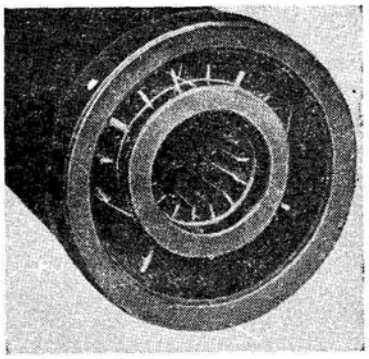


Рис. 1.14. Кольцевой твэл с реактора EDF-3,4. в графитовой трубе Ø 70×54 мм с двухсторонним охлаждением

1.4. Ядерно-топливные материалы

Рассмотрим кратко наиболее распространённые материалы топливных сердечников и их свойств.

Металлическое урановое топливо наиболее выгодно, т. к. при большом содержании элемента с делящимся нуклидом, высокой плотности и хорошей теплопроводности оно позволяет получать большую энергонапряженность в активной зоне. Однако ряд присущих ему серьёзных недостатков (малые допускаемые выгорания из-за значительного измерения размеров и геометрической формы вследствие фазового перехода из α-фазы и ϕ-фазы, наступающего при 662 °С, ограничения по рабочей температуре, обусловленные радиационным ростом и газовым распуханием, интенсивное коррозионное взаимодействие при контакте с водой, паром, углекислым газом) приводит к тому, что металлическое топливо имеет ограниченное применение.

Для преодоления указанных недостатков применяют легирование урана железом, кремнием, алюминием, молибденом, цирконием, ниобием, хромом, а также соответствующую термообработку. Сплавы урана с высоким содержанием молибдена (9–10 % по весу), кроме того, имеют улучшенную коррозионную стойкость при повышенной температуре и большую устойчивость в условиях радиационной и тепловой нагрузки.

В последние годы в энергетических реакторах широко используют керамическое ядерное топливо. Двуокись урана обладает высокой температуростойкостью ($T_{\text{плавления}}$ = 2800 °С) и, что особенно важно, высокой радиационной стойкостью.

Недостатком двуокиси урана является меньшая по сравнению с металлическим топливом плотность и процентное содержание урана, чрезвычайно низкая теплопроводность.

Последнее обусловливает высокие градиенты температуры в двуокиси, достигающие 400 °С на 1 мм, что в конечном итоге влияет на прочностные характеристики твэл.

Для ядерных реакторов с газовым и жидкометаллическим теплоносителем могут быть использованы карбид урана UC_2 и монокарбид урана UC. Особенно перспективным является монокарбид урана, имеющий высокую температуру плавления, большую плотность атомов делящегося вещества, хорошую стабильность и достаточно высокую теплопроводность по сравнению с UO_2.

Недостатком монокарбида урана является высокая хрупкость и меньшая химическая устойчивость особенно при повышенных температурах. Перспективным ядерным топливом для высокотемпературных реакторов является мононитрид урана, который по своим ядерно-физическим свойствам превосходит UO_2 и UC.

Указанные соединения могут быть использованы в компактном виде либо могут быть диспергированы в неделящемся разбавителе (обычно матричным материалом являются тугоплавкие металлы, графит, керамика).

Основное преимущество дисперсионного топлива – его высокая радиационная стойкость при достижении высоких выгораний.

В последнее время приобрела актуальность программа использования плутония в качестве топлива легководных реакторов и реакторов на быстрых нейтронах. Это связано с накоплением плутония в топливе АЭС в количестве 1 кг на каждые 4 Мвт мощности.

Тепловыделяющие элементы, содержащие плутоний, приготовляются на основе смешанного оксидного топлива UO_2-PuO_2 в форме таблеток или виброуплотнённого порошка частиц сферической формы. Материал оболочки – нержавеющая сталь. Предложены твэлы дисперсионного типа с топливом в виде твердого раствора $(U,Pu)O_2$ и матрицей из нержавеющей стали.

При конструировании твэл со смешанным UO_2-PuO_2-топливом следует учитывать ряд обстоятельств:

1. Отношение атомов O/Me должно быть равно 2.
2. Вследствие низкой теплопроводности градиент температуры в стержне диаметром 5 мм может достигать 1000 °C с температурой в центре равной температуре плавления.
3. При высоких градиентах температуры в центральной части топлива давление его паров будет выше, чем в периферийной. В процессе облучения указанное приводит к изменению состава топлива по радиусу сердечника твэл. В горячей области концентрируется менее летучая PuO_2, а в холодной – UO_2.

1.5. Материалы оболочек тепловыделяющих элементов

Так как оболочки твэлов работают в наиболее трудных условиях одновременно длительного воздействия высоких температур и полей облучения, тепловых потоков, давления, коррозионного действия теплоносителя, топлива и продуктов деления к ним предъявляют жёсткие требования:

а) малое сечение поглощения нейтронов;
б) механическая прочность и неизменность формы под действием температурного и радиационного воздействия;
в) высокая теплопроводность;
г) коррозионная и эрозионная стойкость в теплоносителе и совместимость с ядерным топливом.

Толщину оболочки выбирают, исходя из условий обеспечения достаточной прочности. Она составляет 0,2÷0,4 мм для стальных и 0,4÷0,8 мм для циркониевых и алюминиевых оболочек.

Алюминий и его сплавы имеют малые сечения поглощения нейтронов, высокие коэффициенты теплопроводности, достаточно доступные и дешевые. Однако из-за низкой температуры плавления (660 °С), пониженной прочности и плохой коррозионной стойкости при температурах, превышающих 250 °С их область применения ограничивается температурами 250÷300 °С. Следует отметить, что алюминий и его сплавы используются только для реакторов с водяным и газовым теплоносителем и не применяется с жидкометаллическим теплоносителем.

Для реакторов, охлаждаемых углекислым газом, оболочка твэла может изготавливаться из магниевых сплавов. В английских уран-графитовых реакторах применяется сплав маг-нокс (0,05÷0,1 % Be, 0,10 % Ca, 1,4 % Al, остальное магний). Сплав устойчив в CO_2 до 450 °С. При температурах газа 500÷520 °С для оболочек твэл предполагается использовать магний-бериллиевый сплав (15 % Be). Для реакторов с водяным теплоносителем магний и его сплавы не используются. Цирконий и его сплавы являются одними из перспективных конструкционных материалов реактора.

Цирконий имеет малое сечение поглощения тепловых нейтронов, высокую температуру плавления, малую плотность, невысокий коэффициент расширения и хорошие пластические свойства. К недостаткам следует отнести трудность его получения в чистом виде, малую коррозионную стойкость в воде при температурах 300÷400 °С. В реакторах с газовым и жидкометаллическим теплоносителем цирконий можно использовать только до температуры 500 °С. Циркониевые сплавы имеют более высокую коррозионную стойкость.

Широкое распространение получил циркалой-2. Циркалой-2 содержит 1,2÷1,7 % олова, 0,07÷0,2 % железа, 0,05÷0,15 % хрома, 0,03÷0,08 % никеля. Циркалой-2 коррозионностоек в воде при температурах 320÷360 °С.

В отечественном реакторостроении используется сплав циркония с 1 % ниобия, сплав циркония с 0,5 % вольфрама, сплав циркония с 2,5 % ниобия.

Нержавеющие стали обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью, хорошими технологическими свойствами. Наибольшее распространение получили хромо-никелевые нержавеющие стали ОХI8Н9Т, 1Х18Н9Т (американские марки стали 304, 347). Состав стали IXI8H9T следующий: железо – 70,7 %, хром – 18 %, никель – 9 %, титан – 0,8 %, марганец – 1,5 %. Плотность стали – 7,95 г/см^3. Нержавеющая сталь надёжно и длительно работает в воде при температурах до 360–400 °С, в жидкометаллическом и газовом теплоносителе соответственно до 600 °С и 700 °С.

Стали показали хорошую совместимость с различными видами ядерного топлива.

Металлический уран совместим со стальной оболочкой при температуре до 500 °С, двуокись урана – до 750 °С, монокарбид урана – до 600 °С.

В случае использования газовых и жидкометаллических теплоносителей с температурами 700–900 °С вместо стальных оболочек необходимо использовать нихромы с содержанием 65÷85 % Ni, 10–20 % Cr, O÷25 % Fe, а также никелевые сплавы с содержанием 20 % C, 25 % Ni, 55 % Fe.

1.6. Топливные кассеты и сборки

Кассета – это строго определённое количество твэлов, конструктивно объединённых между собой, с обеспечением условий эффективного тепловыделения и теплоотдачи, а также оперативной замены, предусмотренной правилами эксплуатации.

Кассета состоит из следующих частей:

1. *Рабочая часть* – твэлы, свободно размещённые в узлах дистанционирующих решёток.
2. *Несущий каркас* – из продольных труб (или одной трубы) с поперечными дистанционирующими решётками, расстояние между решётками равно примерно 30 диаметрам твэл. Размеры и конструкция каркаса определяются расчётной долей конструкционного материала в активной зоне реактора.
3. *Концевые детали* – головка и хвостовик, служащие для захвата при перегрузке и крепления в активной зоне.
4. *Тонкостенный чехол*, служащий для направления движения теплоносителя и позволяющий регулировать его расход по кассетам, если это требуется.

Если кассета размещается в отдельном канале, то чехол не требуется и она представляет собой тепловыделяющую сборку (ТВС).

Несущий каркас ТВС может быть выполнен в виде центральной несущей трубы с закреплёнными на ней дистанционирующими решётками. В трубе при этом могут размещаться датчики СУЗ, либо дросселирующие вставки, регулирующие расход теплоносителя в межтвэльном пространстве.

Роль каркаса ТВС может выполнять внешняя графитовая труба (для газоохлаждаемых растворов с графитовым замедлителем), внутри которой размещается пучок твэлов (реактор AGR) или одиночный твэл с оребрённой оболочкой (реактор GCR). В этом случае графитовая труба ещё служит защитой массива кладки от радиационных повреждений. Бескаркасные ТВС устанавливаются в каналах друг на друга.

Тепловыделяющая сборка высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (типа ГТ-МГР или HTGR) представляет собой групповой твэл. Она выполнена из графита в виде кирпича гексагонального

сечения, снабжённого стыковочными элементами (выступы, впадины). По длине кирпич имеет глухие и сквозные отверстия. В глухих отверстиях размещаются таблетки карбида урана, а сквозные предназначены для прокачки теплоносителя, гелия. Из подобных кирпичей-сборок формируется активная зона. Все размеры, толщины, зазоры определяются условиями нейтронно-физической и теплогидравлической оптимальности, а также прочностью материалов и удельной мощностью реактора.

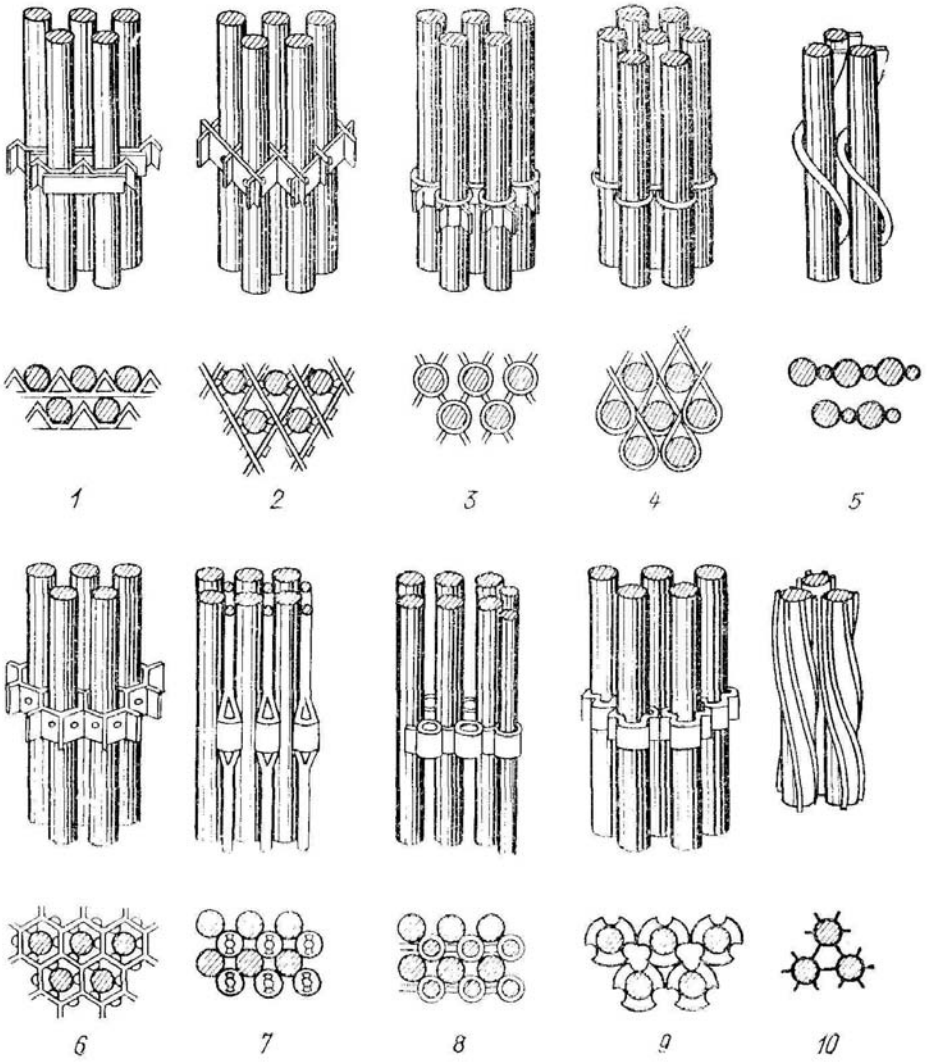


Рис. 1.15. Дистанционные решетки ТВС со стержневыми твэлами: 1 – треугольный тип; 2 – ромбический; 3 – кольцевой; 4 – петлевой; 5 – стержни, обвитые проволокой; 6 – сотовый тип (треугольное расположение); 7 – трубчатые дистанционирующие прокладки, соединенные по оси; 8 – трубчатые дистанционирующие прокладки с поперечной связью; 9 – ленточная фигурная дистанционирующая решетка; 10 – шесть спиральных ребер на каждом стержне

1.7. Выгорающие поглотители нейтронов для компенсации избыточной реактивности

В дополнение к подвижным регулирующим стержням (активная компенсация реактивности), часть $\rho_{зап}$, расходуемая на выгорание и шлакование, может быть скомпенсирована пассивным способом – выгорающим поглотителем (ВП), находящимся в топливе, замедлителе или теплоносителе.

Выгорающий поглотитель используется для компенсации избыточной реактивности в начале компании реактора, а также при профилировании мощности в активной зоне для достижения оптимального выгорания топлива.

Таблица 1.1

Поглощающиеся материалы и их свойства

Вещество	Атомный номер	Атомный вес	Удельный вес, г/см^3	Сечение поглощения, барн	Период полу-распада	Температура плавления, °С
Бор ^{10}B	5	10	2,45	3840	–	2300
Бор естест-венный	5	10,82	2,45	750	–	2300
Кадмий	48	112,4	8,65	2450	43 дня	321
Гадоли-ний	64	157,2	7,95	46000	18 ч	1350
Европий	63	153	5,22	4300	16 лет	900
Гафний	72	178,5	13,1	105	46 дней	2222
Диспрозий	66	162,5	8,56	950	2,3 часа	1400

Характеристики регулирующего стержня и СВП:
размер оболочки регулирующего стержня и СВП – 8,2 × 0,6 мм;
материал оболочки – нержавеющая сталь;
диаметр сердечника – 7 мм;
материал сердечника регулирующего стержня – EuO_3+алюминевый сплав
материал сердечника СВП – бор в циркониевой матрице;
концентрация естественного бора в СВП – 1 %.

1.8. Биологическая защита реактора (конструкции, материалы)

Выбор конструкции защиты определяется техническим заданием на проектирование станции, а также стадией ее разработки. Тип реактора, технологическая схема станции и состав оборудования, его компоновка в здании – все это оказывает влияние на вопросы, которые приходится рассматривать при обеспечении радиационной безопасности конкретной АЭС.

Защита от излучений реактора, близлежащих к нему элементов конструкций, коммуникаций и оборудования технологических контуров должна обеспечивать снижение плотности потока радиации в помещениях АЭС и за ее пределами до значений, регламентируемых «Нормами радиационной безопасности». Защита АЭС призвана обеспечить не только безопасные условия работы и жизни обслуживающего персонала станции и населения в районе ее расположения, но и уменьшить плотность потока радиации на материалы конструкций и защиты до допустимых значений. Под действием ионизирующих излучений происходит разогрев элементов конструкций, что может привести к возникновению в них значительных термических напряжений. Кроме того, излучения вызывают изменение ряда характеристик материалов конструкций и защиты. Таким образом, под термином «защита» подразумевают биологическую, тепловую и радиационную защиту.

Опыт проектирования, строительства и эксплуатации российских АЭС показывает, что принцип размещения реактора и основного технологического оборудования в отдельном здании, в зоне строгого режима, является экономичным, позволяющим обеспечить нормальную и безопасную работу АЭС.

На АЭС с реакторами на тепловых нейтронах (корпусного или канального типа) радиальная защита (в направлении, перпендикулярном вертикальной оси активной зоны) является, как правило, основным вертикальным конструктивным элементом здания, к которому примыкает его многоэтажная часть. В этой части располагаются технологические, служебные и бытовые помещения. В направлении вниз от активной зоны защита обычно выполняется из армированного бетона, служащего фундаментом для реактора, а часто и для боковых стен здания. В радиальном направлении за прочным стальным корпусом водо-водяного реактора или тонким кожухом реактора канального типа до последнего времени размещали бак с водой и защиту из обычного или специального бетона.

Применение воды в радиальной защите обусловлено желанием снизить плотность потока нейтронов и теплового излучения на бетон. Иногда кольцевой водяной бак выполняет также роль опорной конструкции реактора. Применение водяной защиты увеличивает общий объем здания. При эксплуатации АЭС приходится тщательно наблюдать за режимом в баке, температурой и т. д. Анализ различных проектов АЭС показывает что стоимость стен, включая биологическую защиту, обычно составляет не менее 30 %, а по трудоемкости не менее 40 % общих затрат на строительные работы. Поэтому понятно стремление проектантов найти наилучшее решение по компоновке оборудования АЭС, особенно оборудования, являющегося источником излучений, разумному выбору материалов для конструкций и защиты.

В последнее время опубликован ряд работ, результаты которых позволяют отказаться от сооружения баков с водой вокруг реактора.

Наибольшее различие в конструкции защиты между реакторами на тепловых нейтронах корпусного и канального типов наблюдается в верхнем от активной зоны направлении. Защитой реакторов корпусного типа обычно служит вода или пароводяная смесь, стальные экраны внутри корпуса реактора и крышка. В реакторах канального типа в качестве материалов защиты используются: графит, сталь, бетон, засыпки из различных смесей (железные и боратовые руды, чугунная дробь, песок), битум и др. Как правило, защита верхнего перекрытия этих реакторов делается разборной.

У реакторов как корпусного, так и канального типа защита в верхнем направлении ослаблена конструкциями органов системы управления и защиты (СУЗ) и другими неоднородностями, «прострел» излучений по которым может давать заметный вклад в суммарную мощность дозы за защитой, что нельзя не учитывать при проектировании.

Конструктивно защита может быть сплошной и раздельной. При проектировании новых АЭС последнему виду защиты отдают предпочтение.

При сплошной защите реактор и его система охлаждения (первичный контур, парогенератор, циркуляционный насос и др.) окружены со всех сторон. При раздельной защите реактор и система охлаждения имеют самостоятельную защиту, т. е. они находятся в разных помещениях. Это позволяет обслуживать их во время остановки реактора.

При раздельной защите различают первичную защиту (защита активной зоны реактора) и вторичную защиту (защита системы охлаждения реактора).

Первичная защита предназначена для ослабления плотности потока нейтронов из активной зоны реактора, чтобы не допустить активации вторичного теплоносителя и значительной наведенной активации в конструкции и оборудовании. Это обеспечивает необходимый доступ к реактору. Первичная защита должна ослабить плотность потока нейтронов до такой степени, чтобы свести к минимуму γ-излучение, возникшее при захвате нейтронов вторичной защитой. Кроме того, защита должна снизить остаточную активность из активной зоны остановленного реактора, чтобы был обеспечен доступ к оборудованию, расположенному между первичной и вторичной защитами.

Вторичная защита предназначена для снижения плотности потока γ- и нейтронного излучения до предельно допустимого значения, для предотвращения прострела излучения через ослабленные места первичной защиты (например, на выходе трубопроводов из реактора), а также для создания барьера, чтобы загрязненный воздух из реакторного зала не попадал в помещения, где находятся люди.

При проектировании защиты реактора следует всегда учитывать теневую защиту – самоэкранирующие свойства компонентов (парогенератор, пульт управления, коридоры и т. п.), которые расположены вблизи реактора. Следовательно, некоторые участки обслуживаемых помещений защищаются естественными экранами и находятся как бы в тени защиты. Теневая защита может полностью поглотить прямое излучение, падающее от реактора на внутреннюю поверхность вторичной защиты. В этом случае на участке теневой защиты толщина вторичной защиты делается значительно меньше. Кроме того, теневая защита используется для обеспечения непродолжительного доступа к некоторому оборудованию в помещении, окруженному вторичной защитой, во время работы реактора.

При проектировании защиты реактора необходимо выполнять следующие требования.

1. Выбирать для защиты относительно недорогостоящие материалы. Снижение плотности потока γ- и нейтронного излучения на один порядок увеличивает стоимость защиты приблизительно на 15 %.
2. Определить предельно допустимые уровни излучения на обслуживаемых и полуобслуживаемых местах. При работающем реакторе предельно допустимые уровни устанавливаются за вторичной защитой, при остановленном – за первичной.
3. Определить энергию и интенсивность излучения (активной зоны реактора, контура первичного теплоносителя и т. п.), от которых проектируется защита.
4. Произвести расчет первичной защиты, для чего необходимо:
   а) определить мощность и распределение источников γ- и нейтронного излучений в активной зоне реактора;
   б) учесть вторичные излучения, возникающие в активной зоне и в защитном материале реактора;
   в) выбрать защитный материал снаружи активной зоны, чтобы достичь максимального поглощения γ- нейтронного излучений и минимальной возможности возникновения вторичного γ--излучения;
   г) учесть количество выделившегося тепла в защите в результате рассеяния энергии нейтронов и γ-излучений, чтобы оно не превышало допустимых пределов. При большом тепловыделении в материалах с плохой теплопроводностью (например, в бетоне) могут возникнуть термические напряжения. В этом случае необходимо предусмотреть дополнительное охлаждение (тепловую защиту).
5. Определить выход излучения от системы первого контура теплоносителя, которая представляет собой совокупность источников различных геометрических форм (цилиндры, диски, сферы и т. п.). Затем рассчитать вклад, который дает излучение от каждого источника на интересующем участке защиты.

6. Располагать высокоактивные источники в середине реакторного помещения (т. е. дальше от вторичной защиты), менее активные – от середины в направлении к периферии, чтобы можно было использовать их самоэкранирующие свойства. Из опыта эксплуатации АЭС известно, что самоэкранирование может ослаблять плотность потока нейтронов, выходящих из первичной защиты, до 20 раз.
7. Трубопроводы с первичным теплоносителем, имеющие большую активность, должны быть по возможности короче. Трубопроводы с обслуживаемой арматурой прокладываются в бетонированных каналах, закрытых сверху чугунными плитами.
8. Первичные контуры (если их несколько) симметрично располагать относительно первичной защиты. Это значительно сократит толщину вторичной защиты. При наличии самоэкранирующей защиты больших размеров трубопроводы первичного контура можно располагать асимметрично.
9. Следует сооружать дополнительную (или использовать теневую) защиту вблизи источников с большой активностью, чтобы их излучения сделать соизмеримыми с излучениями более слабых источников. (так, парогенераторы размещают в отдельных бетонированных боксах с чугунной дверью) Такие мероприятия сокращают общую толщину вторичной защиты.
10. Необязательно все реакторное помещение окружать вторичной защитой. Незащищенными можно оставлять участки, где не предполагается нахождение обслуживающего персонала.
11. Предусмотреть службу радиационной безопасности.

Расчет первичной защиты реактора

Для всех типов реакторов первичная защита является основным элементом в общем комплексе конструкций биологической защиты ядерной энергетической установки. Она окружает активную зону и воспринимает почти всю нагрузку гамма- и нейтронного излучения, возникающего при работе реактора.

Первичная защита рассматривается как многослойная и в зависимости от типа реактора может включать в себя:

1. Отражатель.
2. Радиационную защиту корпуса.
3. Корпус реактора.
4. Тепловую защиту бетона.
5. Бетон первичной защиты.

В отдельных случаях функционально слои могут объединяться. Например в реакторе ВВЭР, функции первого и второго слоев совме-

щаются в одном слое – железо-водной защите (ЖВЗ). Роль отдельного слоя первичной защиты может также выполнять материал энергооборудования, например, металл стенок секций парогенераторов, размещенных особым образом [17].

Основное назначение первичной защиты – предохранить теплоноситель второго контура и обслуживаемое оборудование от недопустимой активации.

Размеры и эффективность первичной защиты определяются параметрами как главного источника излучений (активная зона), так и источниками вторичного излучения, возникающего в самих защитных слоях, а также свойствами используемых материалов.

Выбор защитной композиции

Предлагается составить четырехслойную композицию и пронумеровать слои в направлении удаления от поверхности активной зоны.

Роль первого слоя защиты выполняет отражатель. Его толщина определяется нейтронно-физическим расчетом.

Второй слой защиты объединяет стенки корпуса реактора, стенки кожуха тепловой защиты и иногда стенки теплообменника (или парогенератора).

Третий слой – это тепловая защита. Ее толщина редко превышает 1 м.

Четвертый слой является биологической защитой, предназначенной для снижения опасных излучений до уровня предельно допустимых. Толщина определяется расчетом.

Выбор материалов и толщина внутренних слоев защиты зависят от типа реактора. Рекомендации приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Состав первичной защиты некоторых типов энергетических реакторов

Тип реактора	Номер слоя			
	1	2	3	4
ВВЭР	ЖВЗ (0,3–0,4)	Fe (0,2 м)	H_2O (1 м)	Бетон
РБМК	C (0,9–1,0)	Fe (0,1–0,2 м)	H_2O (1 м)	Бетон
GCR	C (0,9–1,0)	Fe (0,2 м)	Fe C (0,5 м)	Бетон
AGR	C (0,9–1,0)	Fe (0,1–0,2 м)	ж/бетон (1 м)	Бетон
SGR	C (0,9–1,0)	Na (0,3–0,5 м)	Fe C (0,5 м)	Бетон

2. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КРИТИЧЕСКОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕАКТОРА

2.1. Предварительный расчёт

Схема расчёта реактора на тепловых нейтронах начинается с предварительной оценки размеров активной зоны, которые обеспечили бы нужный теплосъём при заданной мощности аппарата [4, 41].

Перед расчётом реактора необходимо выбрать шаг решетки, конструкцию, размеры и материалы тепловыделяющих элементов, их число в канале или кассете.

В гетерогенных реакторах максимально допустимая тепловая нагрузка q_{max} на поверхности тепловыделяющих элементов является важным параметром, который определяет размеры активной зоны при заданном шаге решетки.

В реакторах с водяным охлаждением эта величина не должна превышать критическую тепловую нагрузку, т. е. нагрузку, при которой пузырьковое кипение на теплопередающей поверхности переходит в пленочное.

В реакторах типа ВВЭР эта максимальная тепловая нагрузка составляет 1,2÷1,5 Гкал/м^2·час.

Для предварительных расчётов можно вместо величины q_{max} использовать обобщенные данные для средней удельной энергетической нагрузки.

Исходя из требуемой мощности реактора размеры активной зоны можно оценить следующим образом (табл. 2.1):

$$V_{а.з} = \frac{N}{N_0}\eta \text{, см}^3 \text{ ;} \tag{2.1}$$

$$D_{а.з} = \sqrt[3]{\frac{4V_{а.з}}{\pi m}} \text{, см ;} \tag{2.2}$$

$$H = mD \text{, см,} \tag{2.3}$$

где $V_{а.з}$, D, H – объём, диаметр, высота активной зоны, см; m – отношение высоты к диаметру, обычно m = 0,8÷1,0; $\boldsymbol{N}$ – заданная мощность реактора, кВт; η – коэффициент, учитывающий увеличение объёма реактора из-за размещения регулирующих стержней.

Таблица 2.1

Обобщенные характеристики реакторов различных типов

Тип реактора	$\overline{N_0}$, кВт/л	$m = \frac{H}{D}$
1. Уран-графитовый реактор с водяным теплоносителем	2,0÷6,0	0,6÷1,0
2. Газо-графитовые реакторы: магноксового типа усовершенствованного типа высокотемпературные	 0,5÷1,5 1,5÷2,8 3÷15	 0,5÷1,1 0,9 0,8÷1,1
3. Уран-графитовые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем	3÷15	0,8÷1,1
4. Водо-водяные реакторы: с водой под давлением с кипящей водой	 50÷120 20÷60	 0,85÷1,1 0,7÷1,1

Коэффициент отличается от единицы, если регулирующие стержни занимают отдельные ячейки реактора (η = 1,1÷1,3).

Максимальная удельная объёмная нагрузка активной зоны

$$N_{0\max} = \overline{N}_0 K_v, \tag{2.4}$$

где K_v – схемный коэффициент неравномерности тепловыделения. Обычно для теплового реактора с однородной активной зоной K_v = 2÷3. Максимально допустимая тепловая нагрузка

$$g_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{0{,}116 \cdot П_0 \cdot n}, \text{ Гкал/м}^2\cdot\text{час}, \tag{2.5}$$

где $П_0$ – периметр тепловыделяющей поверхности одного твэла, см; n – число твэлов в кассете; $S_{яч}$ – площадь сечения ячейки, см^2.

Необходимая для отвода тепла скорость определяется в максимально напряженном тепловыделяющем элементе из уравнения баланса тепла

$$v = \frac{g_{\max} П_0 H}{3{,}6 K_z \gamma \Delta i S}, \tag{2.6}$$

где H – высота активной зоны, см; K_z – осевой коэффициент неравномерности (K_z = 1,2÷1,5); S – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один элемент, см^2; v – скорость теплоносителя на входе, м/с; γ – удельный вес теплоносителя при рабочих параметрах, г/см^3; Δi – разность теплосодержания теплоносителя на выходе, ккал/кг.

Если теплоёмкость C_p (ккал/кг·град) не зависит от температуры, то

$$\Delta i = C_p \left(t_{вых} - t_{вх}\right). \tag{2.7}$$

В противном случае величину теплосодержания как функцию параметров теплоносителя следует определять по специальным таблицам или графикам [53].

Скорость теплоносителя выбирают возможно большей. В настоящее время для воды, органических жидкостей и легких металлов можно принимать скорость до 10 м/с.

2.2. Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны (горючее, оболочки, трубы, теплоноситель, замедлитель). Температура всех элементов реактора принимается равной 20 °С.

Вычисление ядерных концентраций производят для каждого элемента активной зоны и отражателя. Ядерная концентрация *i*-го элемента находится по формуле

$$N_i = \frac{0{,}602 \cdot \gamma_i}{A_i} \cdot 10^{24},\ \text{ядер/см}^3, \tag{2.8}$$

где γ_i – весовая концентрация *i*-го элемента, г/см^3; A_i – атомный вес *i*-го элемента.

Если в качестве топлива используют уран, обогащенный до величины C_5 изотопом U^{235}, то концентрацию этого изотопа и U^{238} определяют по формуле

$$N_5 = N_u \frac{C_5}{100};\ \ N_8 = N_u\left(1 - \frac{C_5}{100}\right), \tag{2.9}$$

где N_u – ядерная плотность урана в объёме топливной композиции с учётом её разбавления другими элементами. Для урана, легированного молибденом, ядерные плотности урана и молибдена определяются следующим образом:

$$N_u = \frac{0{,}6023 \cdot \gamma_u \cdot C_u}{A_u} \cdot 10^{24},\ \text{ядер/см}^3; \tag{2.10}$$

$$N_{Md} = \frac{0{,}6023 \cdot \gamma_u \cdot C_{Md}}{A_{Md}} \cdot 10^{24},\ \text{ядер/см}^3, \tag{2.11}$$

где C_{Md} – соответствующая добавка *Md*.

Если в химическом соединении известны молярная масса и плотность, необходимо определить число молекул в I см^3 для всего соединения и затем, в соответствии с химической формулой, – число атомов.

Например, для воды $N_н = 2N_{H_2O}$, в двуокиси урана концентрация U^{235} в уране $N_5 = C_5 N_{UO_2}$, а $N_0 = 2N_{UO_2}$

$$N_{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O} \cdot 0{,}6023}{M_{H_2O}}, \tag{2.12}$$

$$N_{UO_2} = \frac{\gamma_{UO_2} \cdot 0{,}6023}{M_{UO_2}}. \tag{2.13}$$

Необходимость обработки сечений связана с тем, что их значения, приведённые в справочниках, относятся к энергии нейтронов E = 0,0253 эВ, соответствующей при распределении нейтронов по спектру Максвелла наиболее вероятной скорости v = 2200 м/с.

При физико-нейтронных расчётах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Следует отметить, что максвелловский спектр тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К при энергии примерно равной E_C = 0,2 эВ, которая называется «энергией сшивки».

В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов, спектр сдвинут в область больших энергий.

Для удобства расчётов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру (температура нейтронного газа – $T_{нг}$), которая превышает температуру замедлителя.

Поперечные сечения поглощения и деления, отнесённые к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формуле

$$\overline{\sigma}_a = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 f_a \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}, \tag{2.14}$$

$$\overline{\sigma}_f = 0{,}884 \sigma_{f_0} f_f \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}, \tag{2.15}$$

где σ_{a_0}, σ_{f_0} – табличные значения сечений [1,9]; f_a, f_f – поправочный коэффициент f, учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$ (табл. 2.2).

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50–100 °С.

При расчёте холодного реактора можно принимать температуру нейтронного газа в пределах от 350÷400 К.

Для определения температуры нейтронного газа и энергии сшивки $æ_{гр}$ для холодного реактора можно воспользоваться рекомендациями, изложенными в работах [15, 41, 42].

Таблица 2.2

Функции отклонения от закона 1/v для ^{235}U

Температура нейтронов, $T_н$, К	300	400	500	600	700
$f_a, f_f, (T_n)$	0,979	0,960	0,946	0,939	0,932

Температура активной зоны в холодном реакторе с жидкометаллическим теплоносителем должна на 20÷50 °С превышать температуру плавления теплоносителя. При подсчёте ядерной концентрации необходимо учитывать зависимость плотности теплоносителя от температуры.

Микроскопические сечения рассеяния практически не зависят от энергии тепловых нейтронов, поэтому непосредственно можно воспользоваться для них табличными данными. Макроскопические поперечные сечения вычисляются следующим образом:

$$\Sigma_i = \sigma_i N_i. \tag{2.16}$$

Для гомогенных смесей и гетерогенных сред, рассматриваемых как гомогенные, все макроскопические сечения вычисляются по общему правилу:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^{m} N_{i,roo}\sigma_i = \frac{1}{S_{яч}}\sum_{i=1}^{m} S_i N_i \sigma_i. \tag{2.17}$$

Следует отметить, что для воды Σ таким образом вычислить нельзя из-за сильной химической связи между атомами водорода и кислорода в молекуле. Удобнее всего для воды брать экспериментально измеренные значения $\Sigma_a, \Sigma_s, \Sigma_{tr}$ [42].

$$\Sigma_a^{H_2O} = 0{,}0221 \text{ см}^{-1};$$
$$\Sigma_s^{H_2O} = 2{,}67 \text{ см}^{-1};$$
$$\Sigma_{tr}^{H_2O} = 2{,}31 \text{ см}^{-1};$$
$$\xi\Sigma_s^{H_2O} = 1{,}35 \text{ см}^{-1}.$$

Замедляющая способность вычисляется по следующему правилу:

$$\xi\Sigma_s = \sum_{i=1}^{m} \xi_i N_i \sigma_{si}\ . \tag{2.18}$$

Отсюда можно определить величину ξ для смеси веществ, сплава и т. д.

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^{m} \xi_i N_i \sigma_{si}}{\sum_{i=1}^{m} N_i \sigma_{si}}. \tag{2.19}$$

Нейтронные сечения для температуры 20 °С даны в [1, 10, 12]. Подготовленные исходные данные для физического расчёта сведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные для физического расчёта

Материал	A_i	γ_i	$1\text{-}M_i$	N_i	β_i	$\xi\Sigma_S$	Микроскопическое сечение				Макроскопическое сечение			
							σ_a	σ_f	σ_S	σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	Σ_S	Σ_{tr}
Уран-235														
Уран-238														
Теплоноситель (вода)														
Замедлитель (графит)														
Оболочка твэл														

2.3. Оптимизация параметров ячейки и расчет коэффициента размножения

Общие сведения

В процессе деления ядер под действием нейтронов ($^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow$ продукты деления $+ \nu\text{n}$) на каждый поглощенный нейтрон в среднем образуется 2,5 новых нейтронов (ν). Эти нейтроны могут использоваться для деления других ядер ^{235}U, приводя к образованию еще большего числа нейтронов. В ядерном реакторе цепные ядерные реакции регулируются таким образом, что состояние равновесия достигается, когда на каждый акт деления используется только один из новых нейтронов для дальнейшего деления. В этих условиях эффективный коэффициент размножения равен 1. Если этот коэффициент выше, число нейтронов и, следовательно, интенсивность делений возрастают по экспоненциальному закону. Без какого-либо механизма регулирования выделяющееся при делении тепло в конечном итоге разрушило бы установку на основе цепной реакции деления. Это исключено в энергетических реакторах благодаря различным механизмам регулирования. В ядерных боеприпасах регулирующие механизмы не применяются. Напротив, фактически все условия созданы для достижения возможно большей интенсивности протекания реакции.

Существует широкая возможность выбора конструкции для управляемой цепной реакции деления. Каждая реакторная концепция имеет свои преимущества и недостатки, поэтому было разработано и введено

в эксплуатацию более десятка различных типов промышленных и опытных атомных электростанций (АЭС). Более 90 % этих АЭС относятся к водо-водяным энергетическим реакторам. Поэтому описание реакторов начнем с АЭС с водо-водяным реактором, причем основное внимание будет уделено принципам работы и основным компонентам ядерной энергетической установки.

Основной частью любого реактора является активная зона, в которой размещен делящийся топливный материал. Обычно это обогащенный изотопом ^{235}U диоксид урана (UO_2) в виде стержней, заключенных в трубки из циркониевого сплава (оболочка). Эти тепловыделяющие элементы (твэлы), собранные в пучки, образуют тепловыделяющие сборки (ТВС) или кассеты.

Образующиеся в результате деления ядерного топлива осколки имеют высокую кинетическую энергию, которую они теряют при столкновении с атомами в окружающем материале, в результате чего практически вся кинетическая энергия превращается в тепло. Чтобы поддерживать устойчивую рабочую температуру в реакторе по мере выделения этого тепла, необходимо обеспечить теплоотвод. Охлаждающий материал (теплоноситель), которым в легководном реакторе (LWR) является вода и который поступает в активную зону снизу, нагревается, проходя вдоль твэлов, и выходит из активной зоны в верхней части или в виде перегретой воды (в реакторах с водой под давлением (PWR, DWR, ВВЭР)), или пара высокой температуры (в кипящих реакторах (BWR)). В реакторах с водой пар генерируется в отдельном теплообменнике. Этот пар приводит в движение ротор турбины, соединенный с генератором электрического тока, и конденсируется во внешнем контуре охлаждения на выходе их турбины. За исключением внешней системы охлаждения (река, градирни и т. д.), пароводяные контуры представляют собой замкнутые контуры.

Скорость цепной реакции деления в реакторе регулируется с помощью стержней управления и защиты, которые изготовляют из материала с большим сечением поглощения нейтронов.

Чтобы максимально увеличить сечение деления, которое является наибольшим для нейтронов низких энергий, нейтроны «замедляют» материалом (замедлителем), который упруго рассеивает, а не захватывает нейтроны. В реакторах с водой под давлением функции замедлителя и теплоносителя выполняет обычная (но очень чистая) вода. В других реакторах замедлителем может быть твердый материал, например, графит, а теплоносителем – газ, например гелий.

Реакторы этого типа, в которых топливо физически отделено от замедлителя, называют гетерогенными, тогда как в гомогенных реакторах

топливо непосредственно растворено в материале замедлителя (например, жидкосолевые реакторы).

Система активной зоны реактора размещена в баке (корпусе) из нержавеющей стали. Чтобы защитить обслуживающий персонал от воздействия нейтронов и γ-излучения, испускаемых при делении, корпус реактора окружен толстой биологической защитой. Здание реактора полностью находится во внешней защитной оболочке, так что в случае аварии исключается возможность попадания радиоактивности в окружающую среду. Небольшие потоки воздуха и воды, сбрасываемые с АЭС, подвергаются контролю и очистке от радиоактивных загрязнителей в устройствах «подавления» активности (УПАК).

Тепловыделяющие сборки нельзя использовать до 100 %-го расхода ^{235}U. Деление приводит к образованию продуктов деления. Некоторые из них имеют очень большие сечения поглощения нейтронов (более 100 барн) и конкурируют с цепной реакцией деления в установлении баланса нейтронов. Прежде чем реактор будет «отравлен» или «зашлакован» этими продуктами деления, ТВС приходится заменять. Это осуществляется с помощью разгрузочно-загрузочной машины. Из-за большого числа радиоактивных продуктов деления отработавшие ТВС всегда выдерживают («охлаждают»), чтобы снизить радиоактивность и тепловыделение, в течение нескольких месяцев в бассейнах-хранилищах, заполненных водой и расположенных в здании реактора.

Отработавшие (облученные) ТВС можно позднее перерабатывать, чтобы извлечь невыгоревший делящийся материал, а также любой сырьевой (воспроизводящий) материал; ядра сырьевого материала могут превращаться в делящиеся ядра, например, ^{232}Th и ^{238}U, захватывая нейтроны, образуют делящиеся ^{233}U и ^{239}Pu, соответственно. Химическая переработка ядерного топлива позволяет удалить продукты деления, некоторые из котрых являются достаточно ценными. Однако большей частью продукты деления не выделяют индивидуально, а хранят как радиоактивные отходы. Извлеченный делящийся материал можно использовать для изготовления новых ТВС.

Выделение энергии при делении

Как видно из табл. 2.4., при делении ^{235}U тепловыми нейтронами образуются осколки деления с кинетической энергией около 165 МэВ (в среднем), 2,5 образующихся при делении мгновенных нейтрона имеют среднюю кинетическую энергию около 5 МэВ в целом, а сопутствующие мгновенные γ-кванты – 7 МэВ. Это мгновенное, связанное с единичным актом деления, выделение энергии, равное 177 МэВ, поглощается в окружающем материале.

Продукты деления радиоактивны и распадаются, испуская β-частицы, γ-кванты и антинейтрино; общая энергия распада продуктов деления составляет около 23 МэВ. Около 11 МэВ (значение точно неизвестно) теряется вследствие утечки антинейтрино из реактора и около 1 МэВ энергии распада остается в твэлах реактора; таким образом, в реакторе поглощается ~12 МэВ энергии β-частиц и γ-излучения, которая делится примерно поровну между ними. Захват мгновенных нейтронов в материале реактора происходит с выделением энергии связи; она составляет примерно 10 МэВ. Таким образом, общее количество энергии, выделяющейся в одном акте деления в управляемом реакторе с защитой, составляет примерно 177 + 12 + 10 ≈ 199 МэВ. На практике пользуются средним значением 200 МэВ на деление:

$$E_f = 200 \text{ МэВ/деление} = 3{,}20 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Таким образом, $(3{,}20 \cdot 10^{-11})^{-1} \approx 3{,}1 \cdot 10^{10}$ делений в секунду соответствуют производству 1 Вт тепла в реакторе. Тепловую мощность реактора можно определить по соотношению:

$$P = E_f \Delta N_f / \Delta t ,$$

где $\Delta N_f/\Delta t$ – число делений в единицу времени. Атомная электростанция, производящая 3 ГВт тепловой энергии, будет иметь электрическую мощность 1 ГВт при КПД процесса преобразования тепловой энергии в электрическую 33 %; это соответствует $8{,}1 \cdot 10^{24}$ делений/сут. Так как масса ядра ^{235}U равна $3{,}90 \cdot 10^{-22}$ г, то это должно соответствовать делению $8{,}1 \cdot 10^{24} \cdot 3{,}9 \cdot 10^{-22} = 3160$ г ^{235}U/сут; истинный расход ^{235}U несколько выше, поскольку незначительная часть нейтронов поглощается ядрами ^{235}U без деления.

Вероятность процесса деления

При облучении урана нейтронами в дополнение к их захвату с последующим делением (*n*, *f*) протекает несколько различных процессов: реакции рассеяния, (*n*, *γ*), (*n*, *2n*) и т. д. Все эти реакции важны при анализе физики реакторов, а также при определении химического состава облученных ТВС. Вероятность протекания различных реакций зависит от энергии нейтронов. Различают три области 1) в случае тепловых нейтронов со средними кинетическими энергиями $E_n \leq 1$ эВ деление преобладает над захватом нейтронов, т. е. $\sigma_f > \sigma_\gamma$; 2) в случае надтепловых нейтронов $1 \leq E_n \leq 10^5$ эВ превалируют значительный радиационный захват и резонансное деление. В этой области образуются тяжелые изотопы по реакциям (n,γ): $^{235}\text{U}(n,\gamma)^{236}\text{U}$; $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$; $^{239}\text{Pu}\ (n,\gamma)^{240}\text{Pu}$; 3) в случае быстрых нейтронов $E_n > 0{,}1$ МэВ сечения относительно малы (менее 1 барн).

Спектр нейтронов реактора играет важную роль в физике реактора. На рис. 2.1 показан спектр незамедленных нейтронов деления при

$E_n \approx 2$ МэВ. В ядерном оружии практически все деление происходит на быстрых нейтронах. Ядерные реакторы можно спроектировать таким образом, чтобы деление происходило главным образом на быстрых или медленных нейтронах (нейтронах, замедленных до тепловых энергий, прежде чем они вызовут деление). Это позволяет реализовать две концепции реакторов – реакторы на быстрых и тепловых нейтронах.

Рис. 2.1. Нейтронные спектры некоторых систем на основе цепной реакции деления: 1 – максвелловское распределение; 2 – тепловой реактор; 3 – ядерное оружие; 4 – быстрый реактор; 5 – спектр незамедленных нейтронов деления

Деление преобладает над радиационным захватом. Особое значение имеет возможность деления ^{238}U при высоких энергиях нейтронов.

На рис. 2.1. показан примерный вид спектра нейтронов для реакторов этих типов. В настоящее время наиболее распространены реакторы на тепловых нейтронах, поэтому удобно начать рассмотрение с физики этих реакторов.

Можно предположить, что в реакторе на тепловых нейтронах большая часть нейтронов находится в термодинамическом равновесии с атомами замедлителя, хотя на практике спектр потока нейтронов в энергетических реакторах смещен в сторону больших энергий. Поскольку $E_n = kT$, то при температуре около 300 °C (обычная температура в реакторе типа LWR) $E_n \approx 0{,}05$ эВ (рис. 2.1.). Сечения при «энергиях тепловых нейтронов» (E_T) нормализованы к моноэнергетическим нейтронам, имеющим скорость 2200 м/с; что соответствует $E_n = 0{,}025$ эВ. Значения сечений при этой энергии приведены в табл. 2.4 для сырьевых и делящихся нуклидов. По закону 1/v можно рассчитать сечения при низких энергиях нейтронов для нерезонансных областей. Поскольку в реакторах на тепловых нейтронах нет энергетического спектра тепловых нейтронов в «чистом виде», для расчета выходов продуктов деления в реакторе следует применять значения эффективных сечений, которые отличаются для различных реакторов ввиду особенностей конструкции и материального состава активной зоны.

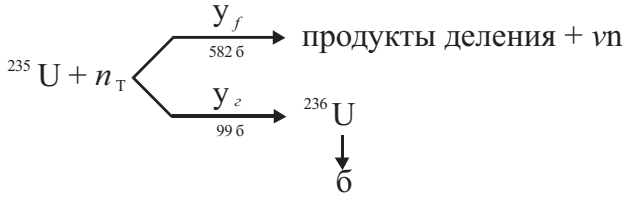
Таблица 2.4

Ядерные характеристики основных нуклидов [*1*]

Параметр	^{232}Th	^{233}U	^{235}U	^{238}U	При-род-ный U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
Радиоактивный распад:	α	α	α	α	–	α	Спонтанное деление	Спонтанное деление
период полураспада, годы	$1{,}405\cdot10^{10}$	$1{,}59\cdot10^{5}$	$7{,}04\cdot10^{18}$	$4{,}47\cdot10^{9}$	–	$2{,}44\cdot10^{4}$	$6{,}54\cdot10^{3}$	14,9
удельная радиоактивность, расп./(с·мкг)	$4{,}06\cdot10^{-3}$	357	0,0800	0,01244	–	2270	8430	$3{,}69\cdot10^{6}$
Тепловые нейтроны (0,025 эВ):								
радиационный захват, σ_γ, б	7,40	48	99	2,70	3,42	269	290	368
деление, σ_f, б	–	531	582	<0,5 мб	4,18	742	0,030	1009
выход нейтронов, ν	–	2,49	2,42	–		2,87	2,90	3,00
коэффициент деления, η	–	2,29	2,07	–	1,33	2,11	–	2,15
Быстрые нейтроны (0,25/1 МэВ):								
радиационный захват, σ_γ, б	0,18/0,15	0,39/0,08	0,24/0,11	0,14/0,17	0,16	0,27/0,09	0,20	0,18
деление, σ_f, б	–	2,25/1,95	1,35/1,25	0,17	0,18	1,62/1,65	0,11/1,59	1,96/1,65
выход нейтронов, ν	–	2,52/2,59	2,49/2,58	2,85	0,11	2,93/3,02	–	2,47/3,3
коэффициент деления, η	–	2,29/2,45	2,12/2,39	–	–	2,53/2,88	–	–

Коэффициент деления

В реакторах на тепловых нейтронах ^{235}U расходуется главным образом за счет деления и радиационного захвата (поглощения без деления):



^{236}U испытывает α-распад. Вследствие большого периода полураспада (T = 2,3·10^7 лет) он накапливается в реакторе. Ядро ^{236}U до α-распада может захватывать нейтрон, образуя ^{237}U, который через несколько суток распадается с образованием ^{237}Np. Выход нейтронов на деление ν зависит от энергии нейтрона, вызвавшего деление, в случае деления ^{235}U тепловыми нейтронами ν = 2,42 (см. табл. 2.4).

Если ввести отношение:

$$\alpha = \sigma_\gamma / \sigma_f = \Sigma_\gamma / \Sigma_f ,$$

то вероятность, что поглощенный нейтрон вызовет деление, равна $\sigma_f /(\sigma_f + \sigma_\gamma) = 1/(1+\alpha)$. Число нейтронов, произведенных на каждый нейтрон, поглощенный в делящемся нуклиде, равно:

$$\eta = \nu /(1+\alpha) ,$$

где η – выход нейтронов на поглощение, называемый также коэффициентом деления. Одним из основных условий для протекания цепной реакции деления является $\eta > 1$. В табл. 2.4 приведены величины η для наиболее важных нуклидов. Наибольшее значение η имеет в случае деления ^{233}U тепловыми нейтронами и деления ^{239}Pu быстрыми нейтронами.

Для смеси изотопов в расчете α следует использовать макроскопическое сечение Σ_γ. Так как для природного урана $\Sigma_f \approx 0{,}71 \cdot 582/100$ и $\Sigma_\gamma \approx (0{,}71 \cdot 99 + 99{,}3 \cdot 2{,}7)/100$, то $\alpha = 0{,}82$ и $\eta = 1{,}33$, что означает возможность цепной реакции деления в природном уране в ядерной энергетической установке на тепловых нейтронах.

Замедление нейтронов

Техническая реализация процесса замедления нейтронов – одна из определяющих конструктивных особенностей теплового реактора. Быстрые нейтроны, испускаемые при делении, теряют свою кинетическую энергию при упругих столкновениях с ядрами конструкционных материалов.

Среднелогарифмическая потеря энергии нейтронов на одно столкновение определяется выражением:

$$\xi = \ln(E_n / E_n'),$$

где E_n' – энергия нейтрона после столкновения. Из табл. видно, что обычная вода (т. е. H_2O) наиболее эффективно понижает энергию (скорость) нейтрона. Среднее число столкновений η, требуемое для понижения энергии нейтрона с E_n^0 до E_n определяется выражением:

Таблица 2.5

Физические свойства некоторых материалов замедлителей

Свойство	H_2O	D_2O	Be	C
Ядерная концентрация $N_0 \cdot 10^{-30}$, ядер/м^3	0,0334	0,0334	0,123	0,0803
Плотность ρ, т/м^3	1,0	1,10	1,84	1,62
Микроскопическое сечение поглощения σ_a (тепловые), б	0,66	0,00092	0,009	0,0045
Макроскопическое сечение поглощения Σ_a (тепловые), м$^{-1}$	1,7	0,0080	0,13	0,036
Микроскопическое сечение рассеяния σ_s (надтепловые), б	49	10,6	5,9	4,7
ξ	0,927	0,510	0,209	0,158
$\xi \cdot \Sigma_s$(надтепловые)$\cdot \Sigma_a^{-1}$ (тепловые)	62	5860	138	166
Квадрат длины диффузии L_m^2, м^2	$7{,}62 \cdot 10^{-4}$	2,89	$4{,}8 \cdot 10^2$	0,287
Возраст τ, м^2	0,0028	0,0115	0,0100	0,0380

$$n = \frac{1}{\xi} \ln(E_n^0 / E_n).$$

Замедляющая способность (*ЗС*) замедлителя зависит также от сечения рассеяния нейтронов и числа ядер рассеивающей среды на единицу объема (N_0) [1]:

$$ЗС = \xi N_0 \sigma_s = \xi \Sigma_s .$$

Замедляющая способность – средняя величина по всей надтепловой области энергий нейтронов. Хороший замедлитель должен слабо поглощать нейтроны, т. е. иметь малое сечение поглощения нейтронов.

В этом отношении воду H_2O превосходят тяжелая вода (т. е. D_2O) и графит, так как в случае H_2O относительно велика вероятность реакции $^1H(n,\gamma)^2H$ (табл. 2.5). Чтобы учесть это свойство, в качестве критерия качества замедлителя в тепловой области энергий нейтронов используют понятие коэффициента замедления:

$$K_{зам} = ЗС / \Sigma_a = \xi\Sigma_s / \Sigma_a .$$

Замедляющие свойства некоторых материалов приведены в табл. 2.5. Качество замедлителя уменьшается в порядке D_2O>C>Be>H_2O. В случае энергетического реактора следует также учитывать стоимость и другие факторы, поэтому в большинстве реакторов при выборе между H_2O и D_2O предпочтение отдается H_2O.

Нейтронный цикл

Для возникновения и поддержания цепной реакции, по меньшей мере, один из нейтронов, испускаемых при делении, должен вызвать новый акт деления. Это условие определяется эффективным коэффициентом размножения k:

$$k = \frac{Число_нейтронов_в_данном_поколении}{Число_нейтронов_в_предыдущем_поколении} .$$

При $k > 1$ число нейтронов во втором поколении превышает число поглощенных нейтронов. При этом условии поток и, следовательно, число актов деления увеличиваются в каждом последующем поколении нейтронов, что в результате приводит к росту мощности реактора.

При $k = 1$ число делений в единицу времени и, следовательно, производство энергии постоянны. При $k < 1$ цепная реакция не может поддерживаться. Реактор, работающий при $k = 1$, называют критическим, при $k > 1$ – надкритическим и при $k < 1$ – подкритическим. Значение коэффициента размножения регулируют с помощью стержней управления и защиты. Они выполняются из материалов, сильно поглощающих нейтроны.

В каждом поколении нейтроны вступают в различные типы взаимодействий (рис. 2.2). Некоторые нейтроны покидают пределы реактора или поглощаются конструкционными материалами или защитой (например, стержнями управления и защиты, замедлителем, теплоносителем и т. д.). Это также следует принимать во внимание. На практике используют два различных коэффициента размножения: k_∞ – в среде бесконечных размеров (т. е. к реактору без утечки нейтронов), и $k_{эф}$ – в физической среде (т. е. в реакторе конечных размеров):

$$k_{эф} = k_\infty \Lambda ,$$

где Λ – вероятность для нейтрона деления избежать утечки из активной зоны. Его называют эффективным коэффициентом размножения.

Чтобы свести утечку нейтронов к минимуму, активную зону реактора окружают отражателем нейтронов, которым для тепловых нейтронов обычно бывает графит, вода или бериллий, а для быстрых нейтронов часто используют железо.

Рассмотрим нейтронный цикл в реакторе, т. е. судьбу нейтронов по мере их перехода из одного поколения в следующее (рис. 2.2, где учтена также утечка, рассмотренная ниже). Начнем с предположения, что имеется реактор, содержащий природный уран и графитовый замедлитель в конфигурации, которая допускает пренебрежимо малую утечку нейтронов ($\Lambda = 1$). Если урановое топливо поглощает 100 нейтронов (N_1), то при делении испускается $N_1 \cdot \eta$ или 100·1,34=134 новых нейтрона. Эти быстрые нейтроны вызывают деление в уране, в результате чего испускаются новые нейтроны. Этот процесс характеризуется величиной ε – коэффициентом размножения на быстрых нейтронах. Значение этой величины в ядерном реакторе зависит от замедлителя. Для природного урана в графите $\varepsilon \equiv 1{,}03$. В результате к 134 нейтронам, выделяющимся при делении на исходных 100 тепловых нейтронах, добавляются еще нейтроны и всего их станет $N_1 \cdot \eta \cdot \varepsilon$ или 1,03·134 = 138 нейтронов. В гомогенных реакторах $\varepsilon \approx 1$.

Эти высокоэнергетические нейтроны замедляются в результате столкновений с ядрами окружающей среды, их энергии постепенно снижаются до тепловой. В диапазоне энергий от 1 до 10^4 эВ зависимости сечений от энергии для ^{235}U и ^{238}U имеют большие резонансные пики, характеризующие радиационный захват, тогда как деление ядер ^{235}U преобладает при тепловых энергиях. Чтобы максимально повысить вероятность деления, необходимо предельно уменьшить потери в результате радиационного захвата в надтепловой области. Этого можно достичь, разделив пространственно замедлитель и ТВС. Быстрые нейтроны, которые образуются в ТВС, замедляются главным образом в замедлителе. Поскольку замедлитель представляет собой материал с легкими ядрами, число столкновений, требуемое для замедления этих нейтронов, минимально. Поэтому недопустимо, чтобы нейтроны диффундировали в ТВС (и поглощались) до того, как будут достигнуты тепловые энергии. Вероятность, что нейтроны пройдут через область энергий резонансных пиков без захвата, называется вероятностью избежать резонансного поглощения и обозначается φ. Из первоначального числа нейтронов N_1 будет, вероятно, получено $N_1 \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi$ нейтронов. В реакторе с природным ураном и графитом $\varphi \approx 0{,}9$. Поэтому из первоначальных 100 нейтронов в область тепловых энергий попадут 138·0,9 или 124 нейтрона следующего поколения.

Сечения поглощения нейтронов увеличиваются для всех нейтронов при приближении к тепловой энергии. В результате, даже если используются материалы с небольшим сечением, некоторое число нейтронов поглощается конструкционным материалом и замедлителем. Вероятность избежать захвата для тепловых нейтронов, таким образом, обозначается θ и называется коэффициентом использования тепловых нейтронов, который в нашем случае можно принять 0,9. Таким образом, из первоначального числа нейтронов N_1 из следующего поколения остаются 112 тепловых нейтронов, чтобы вызвать деление в ядерном горючем.

Эти 112 тепловых нейтронов составляют второе поколение нейтронов, которое в соответствии с определением коэффициента размножения нейтронов соответствует k_∞:

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta .$$

Это выражение называют формулой четырех сомножителей. В нашем случае k_∞ = 1,12.

Для любого гомогенного реактора:

$$\theta = \Sigma_a(\textit{горючее})[\Sigma_a(\textit{горючее}) + \Sigma_a(\textit{замедлитель}) + \\ + \Sigma_a(\textit{другие материалы})]^{-1},$$

где выражение в квадратных скобках – макроскопическое сечение всех реакций поглощения в ТВС; последний термин включает поглощение примесями в конструкционных материалах и продуктами деления равновесной концентрации, образующимися в процессе работы реактора. При введении в активную зону стержней управления $\Sigma_a(\textit{другие материалы})$ возрастает. В случае нуклидов с большими надтепловыми резонансами следует использовать значение эффективных сечений.

Чтобы компенсировать уменьшение θ во время работы, энергетические реакторы проектируют с $k_\infty = 1{,}2 \div 1{,}3$, а не 1,12, как в приведенном выше примере. Используют еще более высокие значения k_∞, как, например, в случае реакторов с высокообогащенным топливом. В реактор с высоким k_∞, который обеспечивает большую глубину выгорания топлива, чтобы уменьшить k_∞, вначале кампании вводят выгорающий поглотитель нейтронов. Таким поглотителем является гадолиний, особенно ^{157}Gd, который составляет 16 % природного гадолиния и имеет сечение поглощения для тепловых нейтронов 254000 барн. Даже небольшое количество гадолиния значительно понижает θ. Хотя концентрация гадолиния непрерывно убывает в процессе работы реактора, одновременно образуются продукты деления, являющиеся поглотителями нейтронов, компенсируя таким образом убыль гадолиния. В результате поддерживается удовлетворительное значение k_∞, позволяющее без за-

труднений компенсировать его превышение над единицей с помощью стержней управления.

Поскольку некоторые элементы имеют очень большие сечения поглощения тепловых нейтронов, все материалы в реакторе должны быть исключительно чистыми (ядерно-чистыми материалами), чтобы k_∞ был возможно большим. Точные соотношения, которые определяют зависимость различных сомножителей формулы четырех сомножителей от геометрии, изотопного состава топлива и т. д., весьма сложны. С помощью современных вычислительных средств расчетным путем можно достаточно точно определить оптимальное геометрическое расположение топлива и замедлителя.

Одним из важных факторов является температурная зависимость k. Повышение температуры обычно оказывает незначительное влияние на $\eta\varepsilon$, но θ увеличивается – приближается к 1 – вследствие уменьшения плотности замедлителя и увеличения средней энергии нейтронов, а это приводит к большему захвату нейтронов с последующим делением в ^{239}Pu, который имеет резонанс реакции деления при энергии 0,3 эВ. С другой стороны, вследствие доплеровского уширения линий сечения захвата в резонансах в надтепловой области уменьшается φ. Доплеровское уширение также увеличивает захват в стержнях управления. Эти эффекты обычно преобладают, так что k_∞ несколько уменьшается с ростом температуры в активной зоне реактора. Этот эффект называют отрицательным температурным коэффициентом реактивности. В кипящем реакторе отрицательный температурный коэффициент обеспечивается также за счет образования пузырьков пара (или паровых пустот), образующихся в замедлителе. Это уменьшает интенсивность термализации нейтронов при одновременном повышении вероятности утечки нейтронов.

Эти особенности важны с точки зрения безопасности реактора. Если возрастает k, то увеличивается интенсивность деления и повышается температура. Если температурный коэффициент положительный, то k будет продолжать возрастать, приводя к дальнейшему повышению температуры и т. д. В конечном итоге реактор достигнет температуры, при которой произойдет термическое разрушение активной зоны, если не будут приведены в действие органы управления и защиты, чтобы уменьшить k. Однако при отрицательном температурном коэффициенте происходит саморегулирование реактора: повышение мощности (и, следовательно, температуры) уменьшает k, что ведет к ограничению повышения мощности. Это называется отрицательной обратной связью по температуре.

Утечка нейтронов и критические размеры ядерного реактора

Во всех действующих реакторах имеет место утечка нейтронов из активной зоны. Вероятность избежать утечки Λ приблизительно описывается вероятностью избежания утечки для быстрого или теплового нейтрона Λ_f и Λ_T, соответственно:

$$\Lambda = \Lambda_f \Lambda_T .$$

Влияние этой утечки, показанное на рис. 2.2, приводит к уменьшению числа нейтронов во втором поколении (112), рассчитанного ранее для k_∞, до $N_2 = 101$. Следовательно, $k_{эф} = 1{,}01$ и $\Lambda = 0{,}9$, т. е. 10 % нейтронов теряется в результате утечки. Пример, приведенный на рис. 2.2, относится к небольшому исследовательскому реактору, работающему на природном уране. В энергетических реакторах k_∞ значительно больше вследствие больших величин η (ввиду использования обогащенного топлива), хотя утечка нейтронов значительно меньше. Вероятность избежать утечки в них составляет более 0,97.

Утечка зависит от среднего расстояния, которое проходит нейтрон от точки рождения, до точки, где он вызовет новое деление, и от геометрии активной зоны и отражателя (геометрического параметра *B*):

$$\Lambda_f = \exp(-B^2\tau),$$

$$\Lambda_T = (1 + B^2 L^2)^{-1},$$

где B – геометрический параметр; L – длина диффузии для теплового нейтрона и τ – возраст нейтронов (переменная, введенная в возрастной теории Ферми)[3].

Объединив все уравнения, можно получить критическое уравнение:

$$k_{эф} = \frac{k_\infty \exp(-B^2\tau)}{1 + B^2 L^2} \approx \frac{k_{эф}}{1 + B^2 (L^2 + \tau)}.$$

Величину $L^2 + \tau$, обычно обозначаемую M^2, называют площадью миграции, а M – длиной миграции:

$$M^2 = L^2 + \tau .$$

Следовательно, для критического реактора больших размеров на тепловых нейтронах имеет место равенство:

$$k_{эф} = \frac{k_\infty}{1 + B^2 M^2} = 1 .$$

Длину диффузии для теплового нейтрона L рассчитывают по выражению:

$$L^2 = L_m^2 (1 - \theta),$$

где L_m – длина диффузии в чистом замедлителе. Значения L_m^2 и τ для различных замедлителей приведены в табл. 2.5.

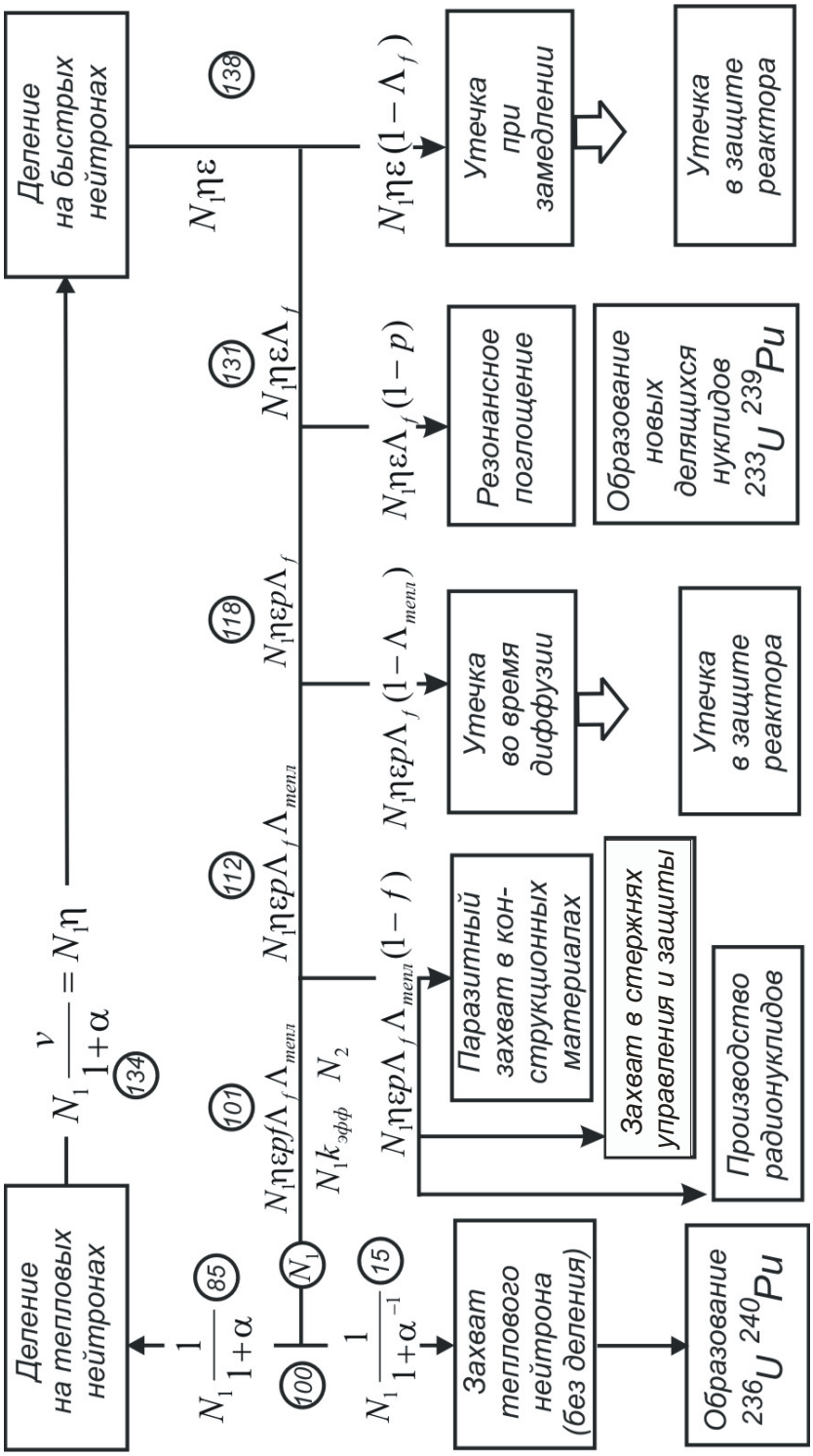


Рис. 2.2. Нейтронный цикл в тепловом реакторе.
Значения числа нейтронов в зависимости от N_1= 100 (первое поколение), приведенные в кружках, относятся к реактору на тепловых нейтронах

Геометрический параметр зависит от распределения потока нейтронов в реакторе, которое в свою очередь зависит от общей геометрии ТВС, включая граничные условия. Расчет геометрического параметра для гетерогенных реакторов довольно сложный, а для гомогенных реакторов действительны следующие простые отношения:

$$B^2 = \pi^2 r^{-2} (сфера),$$

$$B^2 = 3\pi^2 a^{-2} (куб),$$

$$B^2 = 33b^{-2} (цилиндр),$$

где r – радиус сферы; a – сторона куба; b – высота цилиндра, равная его диаметру.

Для иллюстрации вышеизложенного можно рассмотреть задачу.

Ядерный ректор работает на постоянном уровне мощности ($k_{эф} = 1$). Потеря нейтронов в результате поглощения без деления составляет 45 %. Какова доля нейтронов, покидающих активную зону?

Решение: на каждые $\approx$2,5 нейтрона, рождающихся при делении ядра, один расходуется на поддержание цепной реакции (реактор работает на постоянном уровне мощности). В соответствии с условием задачи, 2,5·0,45 = 1,1 нейтрона поглощается без деления. В активной зоне поглощается 1+1,1 = 2,1 нейтрона. Активную зону покидает 2,5 – 2,1 = 0,4 нейтрона или 0,4/2,5 $\approx$0,16 (16 %).

Эффективность использования ядерного топлива

Следует начать с определений. Под ядерным топливом понимается материал, в состав которого входят делящиеся нуклиды. Например, «свежий» (необлученный) диоксид урана является ядерным топливом, в состав которого входит делящийся нуклид ^{235}U. В состав «свежего» оксидного топлива входит также нуклид ^{238}U, называемый сырьевым, и кислород. Под ядерным горючим следует понимать именно делящийся материал. Например, изотопически чистый ^{235}U. Такой материал в природе отсутствует, а в ядерной промышленности нет необходимости в его получении. Имеется высокообогащенный уран.

На рис. 2.4 показан расход делящегося нуклида ^{235}U и образование новых делящихся нуклидов ^{239}Pu и ^{241}Pu (также некоторых продуктов деления и других актиноидов) в результате радиационного захвата в сырьевом нуклиде ^{238}U. Данный рисунок относится к определенному типу реактора, а для других реакторов будут несколько другие зависимости. В реакторе, работающем на тепловой мощности 3 ГВт, будут претерпевать деление 3,16 кг ^{235}U/сут. Некоторое дополнительное количество урана расходуется вследствие реакции ^{235}U $(n,\gamma)^{236}$U (см. уравнение). Чтобы это

учесть, используем множитель $(\sigma_f + \sigma_\gamma)/\sigma_f = 1{,}17$; следовательно, расход ^{235}U составляет 3,16·1,17 = 3,70 кг/сут. Это значение действительно для свежей активной зоны реактора; однако после того как активная зона проработает некоторое время, деление в ^{239}Pu, образующемся в результате захвата нейтрона в ^{238}U, начинает вносить заметный вклад в производство энергии, а еще позднее вклад будет вносить также деление ^{241}Pu. По этой причине расход ^{235}U постепенно уменьшается при приблизительно постоянном производстве энергии в работающей активной зоне. В течение всего срока службы активной зоны из урана, обогащенного до 2 ÷ 3 % по ^{235}U, примерно 40 % общего производства энергии обусловлено делением изотопов плутония (рис. 2.3). В среднем АЭС с реактором LWR электрической мощностью 1000 МВт (КПД 33 %) в течение кампании расходует 2,2 кг ^{235}U и 2,0 кг ^{238}U в сутки.

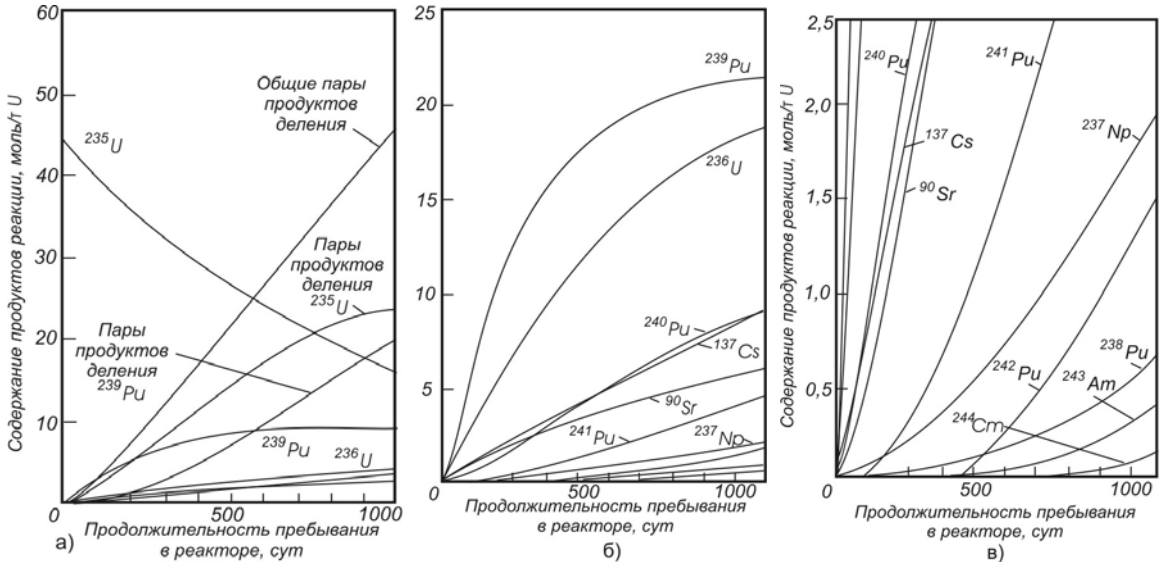


Рис. 2.3. Накопление продуктов деления и актиноидов в топливе: а – топливо с начальным обогащением ^{235}U до 1 %, облученное в графитовом реакторе малой тепловой мощности (~ 230 МВт); б, в – топливо с начальным обогащением ^{235}U до 3,3 %, облученное в водо-водяном реакторе высокой электрической мощности (~ 1000 МВт) (в соответствии с [1])

В результате деления урана и плутония образуется около 3,1 кг продуктов деления в сутки. Чтобы рассчитать выходы этих продуктов, необходимо использовать значения эффективных сечений. Чем больше будет произведено ^{239}Pu и ^{241}Pu на каждое ядро сгоревшего ^{235}U, тем эффективнее может быть использование топлива.

Эффективность использования топлива определяется коэффициентом воспроизводства *C*:

$$C = \eta - 1 - S,$$

где S – потери нейтронов на утечку и радиационный захват в конструкционных материалах, замедлителе и теплоносителе. Если предположить C = 0,8 (действительное значение для реактора на тяжелой воде), деление 100 ядер ^{235}U ведет к образованию 80 новых ядер ^{239}Pu и ^{241}Pu.

Во втором поколении образуются C^2 новых ядер ^{239}Pu и ^{241}Pu. Доля делящихся ядер в топливе, которые претерпевают превращение, составляет x_i $(1 + C + C^2 + ...) \approx x_i/(1\text{-}C)$, где x_i – первоначальная доля делящихся ядер (0,00714 для природного урана).

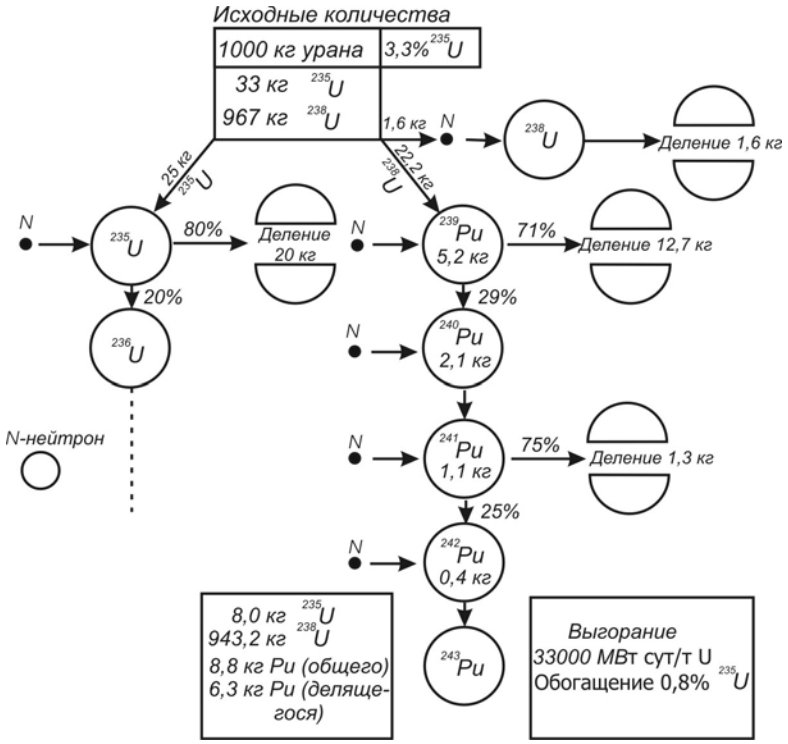


Рис. 2.4. Баланс актиноидов в водо-водяном энергетическом реакторе

Отношение $x_i/(1 - C)$ определяет максимальную эффективность использования топлива. Если бы реактор мог работать таким образом, чтобы был израсходован весь делящийся материал (как исходный, так и образовавшийся в процессе работы реактора), то можно было бы, приняв $C = 0{,}8$, произвести в 5 раз больше энергии, чем только за счет использования исходного количества ^{235}U. К сожалению, это невозможно из-за большого сечения захвата продуктов деления. Реакторы со значениями C, близкими к единице, называют реакторами-конверторами, а реакторы с $C < 1$ – сжигателями. Водо-водяные реакторы могут иметь $C \leq 0{,}6$ и их классифицируют как сжигатели.

Уменьшение θ вследствие накопления продуктов деления и уменьшение количества делящихся ядер – главные причины, которые обусловливают необходимость замены топлива. Очевидно, что если Σ_a (*горючее*) – очень

большое, как в случае высокообогащенного топлива, то можно допустить образование большего количества продуктов деления, т. е. из топлива можно произвести больше энергии, прежде чем θ станет слишком малым.

Эффективность использования топлива определяется выгоранием. Выгорание можно выражать количеством топлива (в процентах), израсходованным до момента, когда его нужно заменять. Например, выгорание, равное 1 %, означает, что на 1 т топлива расходуется 10 кг делящихся и сырьевых ядер (за счет деления и захвата). Однако обычно выгорание топлива выражается количеством тепловой энергии, выделившейся на 1 т топлива. На производство 33000 МВт·сут тепловой энергии [МВт(т)·сут] из 1000 кг обогащенного урана в водо-водяном реакторе расходуется 25 кг ^{235}U и 23,8 кг ^{238}U (рис. 2.4) или 4,88 % первоначального количества урана. Тогда 1%-е выгорание соответствует 33000/4,88 = 6762 МВт(т)·сут/тU. Однако, если учесть 6,3 кг образующегося делящегося плутония (который «заменяет» ^{235}U) общий расход уменьшится до 48,8 – 6,3 = 42,5 кг (или 4,25 %). Следовательно, 1%-е выгорание соответствует 7765 МВт(т)·сут/тU.

Если учесть количество всего израсходованного урана ($\approx$7 т природного урана на 1 т урана, обогащенного до 3,3 % по ^{235}U), то использование природного урана значительно меньше. Однако при возврате плутония в топливный цикл тепловых реакторов эффективность использования топлива повышается до общих цифр, приведенных на рис. 2.4.

Максимальный коэффициент воспроизводства при пуске работающего на уране реактора определяется выражением:

$$C = \eta\varepsilon(1-\varphi)exp(-B^2\tau) + \Sigma_a(238)/\Sigma_a(235),$$

где два слагаемых дают число нейтронов, захваченных ^{235}U в резонансной и тепловой областях, соответственно, на нейтрон, поглощенный в ^{235}U; величина η относится к ^{235}U. Множитель $\exp(-B^2\tau)$ обозначает долю быстрых нейтронов, которые не покидают объем активной зоны (вероятность избежать утечки). Пользуясь этим приближенным выражением, определяем C = 0,50. Если активная зона реактора находится в состоянии равновесия, то необходимо внести поправки на деление в образующемся плутонии. Это дает более высокий коэффициент воспроизводства: обычно 0,7 в реакторе типа LWR.

При $C > 1$ существует возможность произвести больше делящегося материала, чем его расходуется. Этот процесс называют расширенным воспроизводством. Способность реактора к расширенному воспроизводству определяется избыточным коэффициентом воспроизводства ядерного топлива $G = \eta - 2 - S$.

Из табл. 2.5 видно, что все нуклиды ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu имеют $\eta > 2$; на практике, когда при расчете используют значения эффективных сече-

ний η даже больше. В реакторе с этими нуклидами и сырьевым материалом, например ^{232}Th или ^{238}U, можно производить больше делящегося материала, чем расходуется, при условии, что потери нейтронов пренебрежимо малы. Такие реакторы называют реакторами-размножителями. Хотя использование топлива в конверторах можно увеличить, вероятно, до 10 %, расширенное воспроизводство делает возможным использование топливного материала (природного урана и тория) примерно до 70 % (рис. 2.5) при условии многократного оборота топлива (рециклинга).

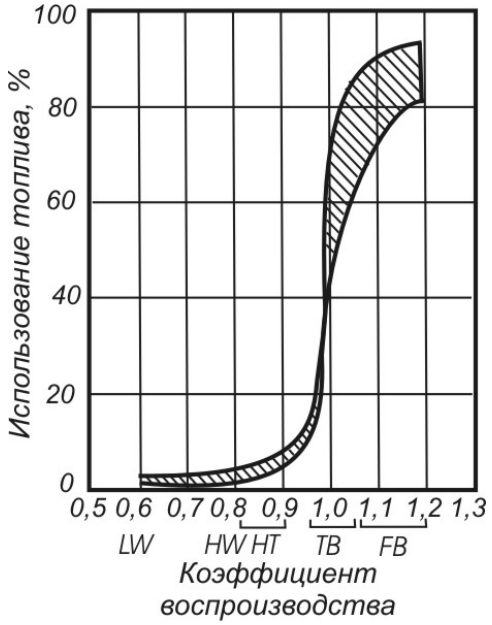


Рис. 2.5. Коэффициенты воспроизводства и эффективность использования топлива: LW – водо-водяной реактор; HW – тяжеловодный реактор; HT – высокотемпературный реактор; TB – реактор-размножитель на тепловых нейтронах; FB – реактор-размножитель на быстрых нейтронах; потери при переработке 1 %, концентрация делящегося материала 0,7 ÷ 2 %, за исключением FB (10 ÷ 20 %)

Из табл. 2.5 видно, что наибольшую величину η имеют ^{233}U в тепловой области энергий нейтронов и ^{239}Pu в быстрой области энергий нейтронов. Это предполагает два различных типа реакторов-размножителей: реакторы на тепловых нейтронах, в основе действия которых лежит реакция $^{232}Th \rightarrow ^{233}U$, и реакторы на быстрых нейтронах, основанных на реакции $^{238}U \rightarrow ^{239}Pu$. Для эффективной работы эти реакторы-размножители должны быть загружены большими (15 ÷ 30 %) количествами ^{233}U или Pu. Эти материалы в настоящее время можно получить только в обычных реакторах-неразмножителях.

Использование топлива в случае быстрого реактора-размножителя, подобного французскому реактору Phenix, выше, чем в реакторах типа

LWR: 1%-е выгорание соответствует примерно 8500 МВт(т)·сут/т тяжелых атомов. Достигнуто выгорание до 15 % (130 000 МВт·сут/т).

Разновидности ядерного топлива

Во всех энергетических реакторах в настоящее время в качестве топлива используется уран или природный, содержащий 0,714 % ^{235}U (тяжеловодные реакторы), или, как правило, обогащенный, в котором содержание ^{235}U повышено до нескольких процентов. Некоторые опытные энергетические реакторы работают также на ^{232}Th (в них воспроизводится делящийся изотоп ^{233}U) или на ^{239}Pu в смеси с ^{238}U в качестве добавки к ^{235}U («смешанное топливо»).

Независимо от того, какое топливо используется в реакторе, твэл должен обладать способностью выдерживать температуры, значительно превышающие 1000 °С, не испытывая какого-либо физического или химического повреждения под воздействием тепла или облучения. Твэлы, изготовленные из металлического урана, обладают высокой теплопроводностью, что максимально снижает теплонапряженность, но, к сожалению, уран плавится при 1130 °С, а плутоний при 640 °С. Более того, металлический уран имеет три, а плутоний шесть аллотропических форм в пределах от комнатной температуры до их температур плавления. В результате влияние поля излучения и высокой температуры как в отдельности, так и вместе, может вызывать перекристаллизацию в различных аллотропических формах, приводя к значительным изменениям физических размеров топливного стержня. Такие деформации в твэле снижают механическую прочность и повышают возможность коррозии, даже если твэлы имеют металлическую оболочку.

В большинстве энергетических реакторов в настоящее время в качестве топлива используют заключенные в оболочку керамические таблетки из UO_2, PuO_2 и ThO_2. В некоторых реакторах испытывается UC. Размер цилиндрических таблеток примерно 10 × 10 мм (диаметр × высота). Твэлы из керамического топлива обладают термостойкостью, не испытывают фазовых превращений металлов и более устойчивы к радиационным эффектам. К сожалению, теплопроводность керамических твэлов ниже чем у металлических, в результате чего в керамических твэлах часто возникают довольно высокие температурные градиенты (до 100 °С/мм). Установлено, что в результате существования таких градиентов керамическое топливо может плавиться в центре твэла (температура плавления UO_2 = 2700 ºС), даже если температура на поверхности твэла значительно ниже температуры плавления топлива. Чтобы обеспечить максимальную теплопроводность в керамическом топливном материале его спекают и прессуют до плотности около 11 г/см для UO_2.

В том случае, когда применяются твэлы из смешанного уран-плутониевого топлива, например в водо-водяных (<5 % PuO_2) или быстрых (≤15 % PuO_2) реакторах, смесь UO_2 – PuO_2 должна быть более однородной в структурном отношении и находиться в форме твердого раствора. Это лучше всего достигается при совместном осаждении этих четырехвалентных актиноидов, обычно в форме оксалатов, с последующим прокаливанием получаемого осадка. Тепловыделяющие сборки из смешанного уран-плутониевого топлива уже в течение многих лет включают в активные зоны многих европейских водо-водяных реакторов без каких-либо технических трудностей. Кроме того, смешанные топлива на основе оксидов урана и тория используются в реакторах на тяжелой воде.

В гомогенном реакторе активная зона может состоять из расплавленного металла, расплавленной соли, водного или органического раствора. В гетерогенных реакторах топливо большей частью представляет собой стержни из оксида металла. Топливным материалом может быть почти любое сочетание ядер делящегося и сырьевого материала в смеси. Возможно их отделение друг от друга, как в концепции «активная зона (делящийся материал) и зона воспроизводства (сырьевой материал)». В качестве замедлителя можно использовать H_2O, D_2O, Be, графит или органический растворитель. Выбор теплоносителя еще шире: им может быть расплавленный металл, расплавленная соль, H_2O, D_2O или органический растворитель, а также газообразная CO_2, гелий или водяной пар. Ниже приведены сокращения названий реакторов различных типов, используемые в отечественной и зарубежной практике.

1. БН – реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.
2. ВВЭР – некипящий реактор с обычной водой (под давлением) в качестве замедлителя и теплоносителя – водо-водяной энергетический реактор.
3. ГТ-МГР – высокотемпературный реактор с газовым теплоносителем и графитовым замедлителем – газотурбинный модульный графитовый реактор.
4. МКЭР – реактор с графитовым замедлителем и обычной водой в качестве теплоносителя – многопетлевой канальный энергетический реактор.
5. РБМК – реактор с графитовым замедлителем и обычной водой в качестве теплоносителя (кипение имеет место в верхней части активной зоны – на выходе) – реактор большой мощности канальный.
6. AGR – усовершенствованный реактор с газовым теплоносителем и графитовым замедлителем.

7. BHWR – кипящий реактор с тяжелой водой в качестве замедлителя и теплоносителя.
8. BWR – кипящий реактор с обычной водой в качестве замедлителя и теплоносителя.
9. FBR – реактор на быстрых нейтронах.
10. GCFBR – быстрый реактор-размножитель с газовым теплоносителем.
11. GCR – реактор с газовым теплоносителем и графитовым замедлителем.
12. HTGR – высокотемпературный реактор с газовым теплоносителем и графитовым замедлителем.
13. HWGCR – реактор с газовым теплоносителем и тяжеловодным замедлителем.
14. HWLWR – реактор с тяжелой водой в качестве замедлителя и обычной водой в качестве теплоносителя.
15. LGWR – реактор с графитовым замедлителем и обычной водой в качестве теплоносителя.
16. LMFBR – быстрый реактор-размножитель с жидкометаллическим теплоносителем.
17. LWR – реактор с обычной водой в качестве замедлителя и теплоносителя.
18. OMR – реактор с органическим теплоносителем и органическим замедлителем.
19. PHWR – реактор с тяжелой водой (под давлением) в качестве замедлителя и теплоносителя.
20. PWR – некипящий реактор с обычной водой (под давлением) в качестве замедлителя и теплоносителя.
21. SGR – реактор с натриевым теплоносителем и графитовым замедлителем.

Преобразование энергии деления в тепловую энергию

Атомные электростанции работают за счет энергии, выделяющейся при делении ядер тяжелых элементов, служащих ядерным горючим (в основном изотопов уран U^{235} и плутоний Pu^{239}), в активной зоне ядерных реакторов.

Типичный баланс энергии, выделяющийся при делении ядер U^{235}, следующий:

Кинетическая энергия осколков деления	82,0 %
Кинетическая энергия нейтронов деления	2,5 %
Энергия излучения γ-квантов	5,3 %
Энергия излучения β-распада	3,4 %
Энергия излучения, возникающего при захвате нейтронов без деления	1,5 %
Энергия нейтрино	5,3 %

Как видно из приведенного баланса, кинетическая энергия осколков деления ядер является основной частью выделяющейся энергии. Практически все осколки деления остаются в объеме таблеток ядерного топлива, теряя всю свою кинетическую энергию. Материал таблеток нагревается и эта энергия может быть отведена в виде тепла от тепловыделяющих элементов (твэл) ядерного реактора. Энергия нейтронов деления и γ-излучения выделяется также в виде тепла, в основном в замедлителе и отражателе, а частично в конструкционных материалах корпуса реактора и в биологической защите, где теряется при охлаждении. Почти полностью теряется, не превращаясь в тепловую, также энергия нейтрино, возникающих при β-излучении, поскольку они (нейтрино) слабо взаимодействуют с веществом и покидают реактор без отдачи энергии.

Таким образом, в энергетических реакторах используемая энергия выделяется в виде тепловой энергии, которая передается теплоносителю, прокачиваемому через активную зону. Поток теплоносителя омывает поверхности твэл или другие поверхности, находящиеся в объеме активной зоны. Пройдя через активную зону, теплоноситель нагревается и «транспортирует» приобретенную тепловую энергию к тому месту контура многократной принудительной циркуляции теплоносителя, в котором относительно горячий теплоноситель передает тепловую энергию относительно холодному «потребителю». В привычной схеме АЭС таким «потребителем» может быть вода парогенератора, поток пара из которого вращает вал турбины, действуя на ее лопатки. В АЭС на базе газоохлаждаемого реактора с газовой турбиной подогретый в активной зоне газ-теплоноситель теряет свою тепловую (внутреннюю) энергию в процессе расширения при попадании на лопатки газовой турбины. Если говорить о ядерной энергетической установке, предназначенной только для производства высокопотенциального тепла, то тепловая энергия, приобретенная теплоносителем при прохождении активной зоны, передается во второй (технологический контур) в теплообменнике.

Пространственное распределение нейтронов в активной зоне

Двухмерное распределение плотности потока нейтронов по активной зоне цилиндрического реактора с равномерным по активной зоне распределением делящегося вещества приближенно может быть получено как произведение радиального и осевого распределений:

$$\frac{q(r,z)}{q(0,0)} = J_0\left(\frac{2{,}405}{R_э} r\right)\cos\frac{\pi}{H_э} z.$$

Необходимо отметить, что в этом соотношении не учитывается характерный всплеск плотности потока тепловых нейтронов в активной зоне

вблизи отражателей, связанный с возвращением отражателем в активную зону замедленных нейтронов. Этот всплеск зависит от толщин отражателей и от отличия времени жизни нейтронов в активной зоне и отражателе.

Время жизни нейтронов в активной зоне, как правило, меньше времени жизни нейтронов в отражателе. Если отражатель достаточно тонкий $(\Delta << M')$, то указанного всплеска может и не быть. Если отражатель толстый, то всплеск может быть заметным. Этот всплеск распространяется от отражателя в глубь активной зоны на расстояние, сравнимое с длиной диффузии возвращаемых отражателем нейтронов.

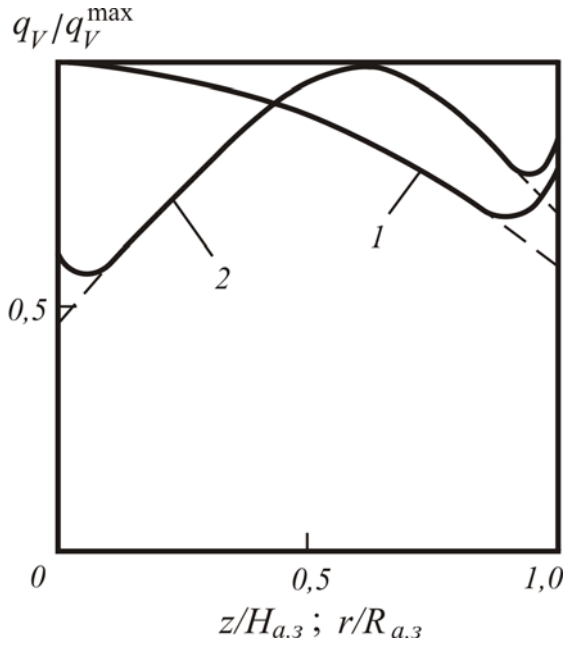


Рис. 2.6. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по радиусу (1) и высоте (2) активной зоны реактора на тепловых нейтронах

На рис. 2.6 представлено характерное распределение плотности потока нейтронов по радиусу и высоте активной зоны реактора на тепловых нейтронах с толстым отражателем, штриховой линией показано приближенное распределение без учета всплеска за счет возвращения в активную зону замедленных отражателем нейтронов. Необходимо отметить, что для реакторов достаточно больших размеров, когда объем области, в которой наблюдается этот всплеск, невелик, и для реакторов с относительно тонкими отражателями всплеском можно пренебречь и пользоваться упрощенными выражениями для распределения плотности потока нейтронов. Особенно это касается вариантных расчетов. Поверочные расчеты реактора необходимо проводить с использованием уточненных распределений плотности потока, которые в настоящее время могут быть легко получены, исходя из многомерных нейтронно-физических расчетов реактора на ЭВМ.

Заметим, что если при работе реактора в его активной зоне находятся регуляторы, например поглощающие стержни, то необходимо учитывать их влияние на распределение плотности потока нейтронов, которое может оказаться существенным. Распределение также изменяется при неравномерном распределении материалов (топливо, замедлитель) в реакторе, в том числе при неравномерном выгорании топлива.

На рис. 2.7 приведена зависимость распределения плотности потока нейтронов по высоте активной зоны реактора от глубины погружения поглощающих стержней в активную зону. Видно заметное влияние глубины погружения стержней на распределение, а именно по мере погружения стержней распределение плотности потока искажается с увеличением плотности потока нейтронов в той части активной зоны, из которой стержни извлечены. При полном погружении стержней в активную зону распределение становится примерно таким же, как для реактора с полностью извлеченными стержнями. Заметим, что для реактора, в нижний торцевой отражатель которого добавлен поглотитель нейтронов, влияние погружения стержней на распределение плотности потока нейтронов меньше (ср. рис. 2.7, *а* и *б*).

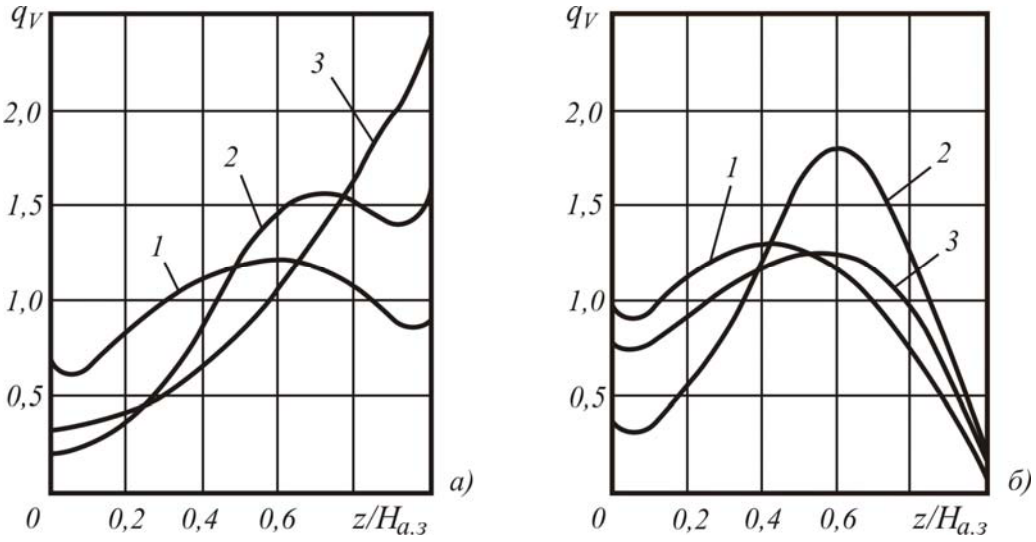


Рис. 2.7. Зависимость распределения плотности потока нейтронов по высоте активной зоны от глубины погружения поглощающих стержней для случая нижнего торцевого отражателя без поглотителя (а) и с поглотителем (б): 1– стержни извлечены; 2, 3 – стержни погружены на 0,4; 0,8 высоты активной зоны соответственно

Радиальное распределение плотности потока нейтронов при наличии поглощающих стержней в активной зоне также заметным образом искажается. Конечно, степень искажения распределения по высоте активной зоны при погружении органов регулирования зависит от многих

факторов, в том числе от эффективности системы стержней, размеров активной зоны, длины миграции нейтронов и т. д. Поэтому влияние органов регулирования на распределение плотности потока нейтронов, когда предполагается работа реактора с большим запасом реактивности на стержнях, необходимо каждый раз специально исследовать.

На распределение плотности потока нейтронов можно воздействовать перераспределением материалов по объему активной зоны. Такое воздействие принято называть физическим профилированием реактора. Наиболее часто физическое профилирование гомогенных ядерных реакторов осуществляется перераспределением по активной зоне делящегося вещества. За счет непрерывного изменения концентрации делящегося вещества можно существенным образом повлиять на профиль энерговыделения как по радиусу, так и по высоте активной зоны реактора.

Основные характеристики регулирующих стержней

Дифференциальная характеристика поглощающего (компенсирующего) стержня. Дифференциальная характеристика компенсирующего стержня (КС) – это зависимость эффективности единицы перемещения (например, 1 мм) стержня от его положения его в активной зоне:

$$\frac{d\rho_{КС}}{dH} = f(H),$$

то есть изменение реактивности реактора ρ при перемещении стержня на единицу длины в различных по высоте положениях. Если физический вес стержня небольшой, то при его погружении в активную зону (АЗ) нейтронное поле по высоте практически не меняется (не деформируется) и дифференциальная характеристика имеет вид симметричной кривой. (рис. 2.8. Кривая 1).

При погружении в АЗ сильного поглотителя или нескольких КС нейтронное поле искажается, его максимум смещается вниз. Максимум дифференциальной характеристики также смещается в нижнюю часть АЗ (кривая 2). Дифференциальная характеристика КС измеряется экспериментально. Она необходима:

1) для определения допустимого шага $h_ш$ подъема КС, исходя из допустимого значения высвобождения реактивности ($\rho_{доп.} = 0{,}1 \div 0{,}2\ \%$) за один шаг перемещения и максимальной эффективности КС $(\frac{d\rho_{КС}}{dH})_{\max}$ по высоте:

$$h_ш = \frac{\rho_{доп.}}{(\frac{d\rho_{КС}}{dH})_{\max}}, \text{ мм.}$$

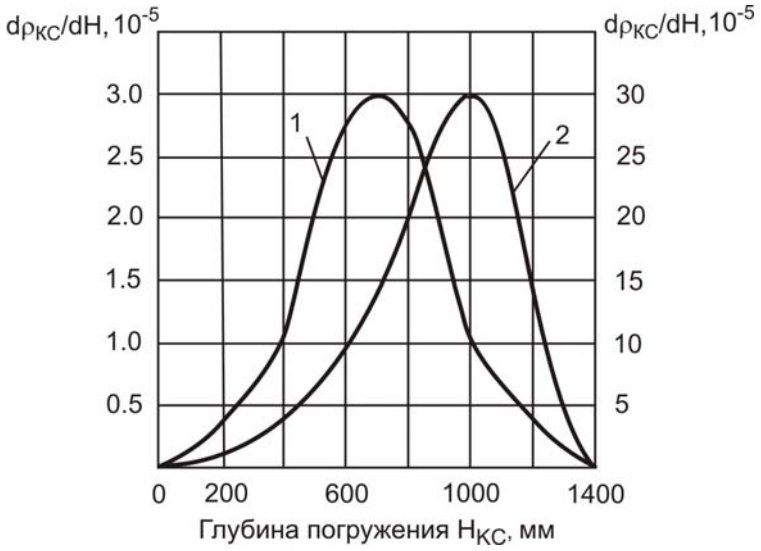


Рис. 2.8. Дифференциальная характеристика

Обычно полагают $(\frac{d\rho_{КС}}{dH})_{\max} \approx 2(\overline{\frac{d\rho_{КС}}{dH}})$;

2) для нахождения допустимой скорости подъема КС, исходя из допустимой скорости высвобождения реактивности реактора $(\frac{d\rho}{dt})_{допуст}$, $\frac{1}{c}$ и максимальной дифференциальной эффективности стержня $(\frac{d\rho_{КС}}{dH})_{\max}$:

$$(\frac{dH_{КС}}{dt})_{допуст} = \frac{(\frac{d\rho}{dt})_{допуст}}{(\frac{d\rho_{КС}}{dH})_{\max}}, \frac{мм}{с}.$$

При этом $\frac{d\rho}{dt} < 0.08\beta_{эфф}$, $\frac{1}{c}$, где $\beta_{эфф}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов в реакторе;

3) для определения изменения реактивности реактора при небольшом перемещении КС на $\Delta H_{КС}$:

$$\Delta\rho = \Delta H_{КС}(\frac{d\rho_{КС}}{dH});$$

4) построения интегральной характеристики.

Интегральная характеристика. Интегральная характеристика КС – это зависимость суммарной реактивности реактора, которую компенсирует КС (эффективности погруженной части КС), от глубины погружения *H* стержня в АЗ:

$$\rho_{КС}(H) = \int_0^H \frac{d\rho_{КС}}{dH} dH,$$

Интегральная характеристика используется для:

1) расчета критического положения КС перед пуском реактора,
2) определения запаса реактивности реактора в любой момент кампании при проведении оценок оставшегося энергозапаса,
3) оценки высвобождаемой или компенсируемой реактивности при перемещении КС на значительное расстояние,
4) определения подкритичности реактора после его останова,
5) анализа поведения реактора при возникновении неисправностей с отдельными КС.

Расчет коэффициента размножения в бесконечной среде

Коэффициент размножения бесконечной среды является важной характеристикой активной зоны реактора, т. к. по его величине можно судить о целесообразности продолжения расчёта того или иного варианта.

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется как произведение четырёх сомножителей:

$$k_\infty=\eta\varepsilon\varphi\theta,$$

где η – коэффициент размножения тепловых нейтронов в горючем; ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах; φ – вероятность избежать резонансного захвата; θ – коэффициент использования тепловых нейтронов.

Для расчёта k_∞ вычисляется каждый сомножитель. Так как задачей расчёта является отыскание оптимальной решетки, то необходимо провести расчёты и сравнить результаты для нескольких вариантов. Так, при расчёте реактора со стержневыми тепловыделяющими элементами, нужно выполнить расчёты для 4÷5 различных диаметров твэл и 4÷5 различных шагов решетки.

Расчёт η

Если в качестве топлива применяется металлический уран (естественный или обогащенный), то η необходимо рассчитать по следующей формуле:

$$\eta = \nu_{f5}\frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}+\dfrac{1-C_5}{C_5}\sigma_{a8}},$$

где ν_{f_5} – число нейтронов, которое испускается при одном акте деления; C_5 – концентрация U^{235} в горючем.

Выражение для η, когда топливо применяется в виде сплава или химического соединения, имеет вид

$$\eta = \nu_f\frac{\Sigma_{f\,топл}}{\Sigma_{a\,топл}}.$$

Расчёт ε

Величина ε в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топлива.

При расчёте величины ε для стержневых и трубчатых твэл можно воспользоваться формулой

$$\varepsilon = 1 + \frac{0{,}092P}{1 - 0{,}52\,P},$$

где P – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром ^{238}U [2, 3, 15, 41, 42] (рис. 2.9).

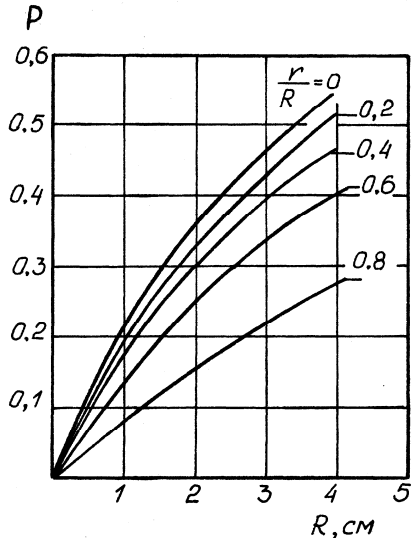


Рис. 2.9. Вероятность P для цилиндрических и кольцевых блоков из металлического урана: R – внешний радиус; r – внутренний радиус

Если в качестве ядерного горючего используется металлический уран с большим обогащением или уран, разбавленный неделящимся веществом, то второй член формулы нужно умножить на ε_1, где ε_1 – пористость блока по ^{238}U:

$$\varepsilon_1 = \frac{N_8}{N_{08}},$$

где N_{08} – число ядер ^{238}U в 1 см^3 естественного урана; N_8 – число ядер ^{238}U в 1 см^3 блока.

Для определения ε в тесных решетках можно воспользоваться формулой Батя–Цыганкова:

$$\varepsilon = \varepsilon_{бл} + \frac{\varepsilon_\infty - \varepsilon_{бл}}{1 + 2{,}3\dfrac{N_н}{N_8}},$$

где $\varepsilon_{бл}$ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока; $\varepsilon_{\infty} = 1{,}19$; $\frac{N_н}{N_8}$ – отношение числа атомов водорода к числу атомов в активной зоне, определяемой равенством

$$\frac{N_H}{N_8} = 2\frac{V_{H_2O}\,\gamma_{H_2O}/18}{V_U\,\gamma_U/238},$$

где V_{H_2O}, V_U – объем воды и урана в активной зоне; γ_{H_2O}, γ_U – удельный вес воды и урана.

Расчёт θ

Если все рабочие каналы содержат сборки твэл, то можно использовать способ гомогенизации, при котором все материалы рабочего канала считают равномерно перемешанными.

Реальная ячейка заменяется эквивалентной ячейкой с одним фиктивным цилиндрическим блоком. Фиктивный блок образуется путем гомогенизации всего содержимого рабочего канала (ядерное горючее, конструкционные материалы, теплоноситель).

Обычно размер фиктивного блока совпадает с радиусом рабочего канала ($R_ф$).

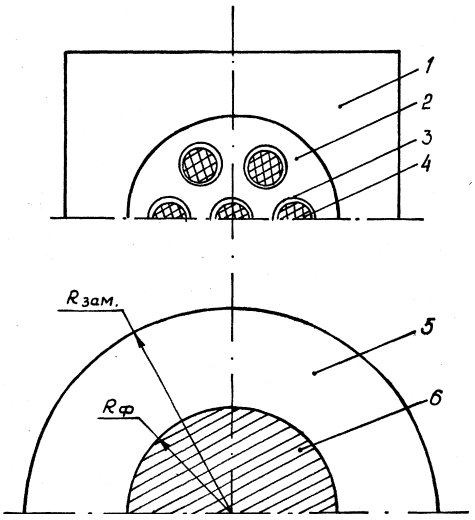


Рис. 2.10. Способы приведения многозонной ячейки к двузонной:
1 – замедлитель; 2 – теплоноситель; 3 – оболочка твэл;
4 – твэл; 5 – гомогенизированный блок замедлителя;
6 – гомогенизированный блок топлива

Расчёт θ. в этом случае ведут в два этапа. Сначала определяют величину $\theta'_ф$ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\frac{1}{\theta'_{ф}} = 1 + F\frac{S_з \Sigma_{аз}}{S_ф \Sigma_{аф}} + (E-1). \qquad (2.26)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования

$$F = \frac{\overline{\Phi}_{зам}}{\overline{\Phi}_ф} = \frac{R_ф}{L_ф} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_ф}{L_ф}\right)}{I_1\left(\frac{R_ф}{L_ф}\right)}, \qquad (2.27)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков, определяемые из таблиц этих функций [29, 43].

С хорошим приближением

$$F = 1 + \frac{\left(\frac{R_ф}{L_ф}\right)^2}{8} - \frac{\left(\frac{R_ф}{L_ф}\right)^4}{192} + \ldots \qquad (2.28)$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе, (E–1)

$$(E-1) = \frac{1}{2}\left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}}\right)^2 \left(\ln\frac{R_{зам}}{L_ф} - 0{,}75\right). \qquad (2.29)$$

Напомним, что

$$\Sigma_{аф} = \frac{1}{S_ф}\sum_{i=1}^{m} \Sigma_{ai} S_i\,, \qquad (2.30)$$

$$L_ф^2 = \frac{1}{3\Sigma_{аф}\Sigma_{trф}}. \qquad (2.31)$$

Затем рассчитывают коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле

$$\theta = \theta'_ф \cdot \theta_0\,, \qquad (2.32)$$

где θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока.

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{аш} S_ш}{\Sigma_{аф} S_ф}. \qquad (2.33)$$

В работах [3, 41, 42] приводится расчёт величины θ с учётом микрораспределения тепловых нейтронов.

Расчёт φ

Существует ряд расчётных формул для различных типов тепловыделяющих элементов [2, 4, 15, 29, 41, 42].

В энергетических реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стержневыми блоками

$$\varphi = \exp\left[- \frac{\left(k_T R_u \sqrt{R \cdot n \cdot \varepsilon_1} + 0{,}73 \cdot n \cdot R_u{}^2 \cdot \varepsilon_1 \right)}{\left(\xi\Sigma_{s3} S_з + \xi\Sigma_{s\phi} S_\phi \right)} \right], \qquad (2.34)$$

где $\xi\Sigma_{S3}$ и $\xi\Sigma_{S\phi}$ – замедляющая способность замедлителя и фиктивного блока; S_3 и S_ϕ – площадь замедлителя и фиктивного блока; R_U – радиус уранового блока; k_T – температурный коэффициент; n – число стержней в пучке; $R.$ – радиус пучка; ε_1 – пористость блока по урану-238. Коэффициент k_T имеет вид

$$k_T = 0{,}775\left(1 + 17{,}5 \cdot 10^{-3}\sqrt{T_u}\right), \qquad (2.35)$$

где T_U – средняя температура урана в К. Если данная система недалека от гомогенной, то при расчёте φ можно использовать формулу для гомогенной смеси [2, 4, 41].

Результаты расчётов представляются в виде распечаток ЭВМ и графиков $K_\infty = f\left(R_{тв}\right)$ при $a = const$ и $K_\infty = f\left(a\right)$ при $R_{тв} = const$.

Если нет каких-либо других, противоречащих требований, то для дальнейших расчётов в проектировании выбирается вариант решетки с максимальным значением коэффициента размножения, т. е. оптимальная решетка. Для оптимальной решетки необходимо уточнить скорость теплоносителя.

2.4. Расчёт эффективного коэффициента размножения

Вычисление коэффициента диффузии и длины диффузии в решетке

По определению коэффициент диффузии D_p и квадрат длины диффузии L_p^2 для гомогенных сред выражается формулами:

$$D_p = \frac{1}{3\overline{\Sigma}_{trp}}; \qquad L_p^2 = \frac{1}{3\overline{\Sigma}_{ap}\overline{\Sigma}_{trp}}, \qquad (2.36)$$

где $\overline{\Sigma}_{ap}$ и $\overline{\Sigma}_{trp}$ – усреднённые по ячейке сечения.

С учётом гетерогенности длина диффузии определяется по формуле

$$L_p^2 = L_{зам}^2(1-\theta) + L_{бл}^2 \cdot \theta. \qquad (2.37)$$

Расчёт квадрата длины диффузии для реактора, имеющего сложные каналы с большим числом твэл, производится по следующей формуле:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \frac{\left[1 + \frac{S_ф}{S_{зам}} \cdot \frac{\overline{\Phi}_ф}{\overline{\Phi}_{зам}}\right] \cdot S_{яч}}{\left[1 + \frac{S_ф}{S_{зам}} \cdot \frac{\overline{\Sigma}_{tr}^{ф}}{\overline{\Sigma}_{trзгз}}\right] \cdot S_{зам}} \cdot \left(1 - \theta_ф^{'}\right). \qquad (2.38)$$

Здесь все величины с индексом *«ф»* относятся к фиктивному блоку.

При расчёте Σ_a для гетерогенного реактора необходимо учитывать блок-эффект в поглощении нейтронов:

$$\Sigma_a = \frac{\Sigma_{a\,зам} S_з + \Sigma_{aф} S_ф \frac{\overline{\Phi}_ф}{\overline{\Phi}_{зам}}}{S_{зам} + S_ф \frac{\overline{\Phi}_ф}{\overline{\Phi}_{зам}}}. \qquad (2.39)$$

Возраст нейтронов в решетке

Если объём блоков ядерного горючего составляет малый процент от объёма активной зоны, то возраст нейтронов чистого замедлителя незначительно отличается от возраста нейтронов в гетерогенной решетке.

Для уран-графитовых реакторов можно принимать возраст нейтронов таким же, как и в чистом замедлителе:

$$\tau_p = \tau_{зам}. \qquad (2.40)$$

Если объём ядерного горючего, теплоносителя, конструкционных материалов и т. д. составляет заметную долю в объёме активной зоны, то возраст нейтронов оценивается по приближенной формуле

$$\tau_p = \tau_{зам}\left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}}\right)^2. \qquad (2.41)$$

Возраст нейтронов в уран-водной решетке (тесная решетка) может быть определен по экспериментальной формуле С.М. Фейнберга:

$$\tau_p = \tau_{H_2O}\left(\frac{S_{яч}}{S_{H_2O}}\right)^{0,5}. \qquad (2.42)$$

При определении возраста в уран-водных решетках можно также воспользоваться формулой, предложенной Дейчем [42].

Эффективный коэффициент размножения реактора вычисляется по формуле

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} e^{-B^2 \tau_p}}{1 + B^2 L_p^2}, \qquad (2.43)$$

где B^2 – геометрический параметр.

Для реактора с отражателем при применении этой формулы необходимо учитывать эффективные добавки за счёт отражателя. Расчёт по этой формуле можно производить, если уже заданы размеры реактора. В этом случае при расчёте геометрического параметра фактические полуразмеры зоны увеличиваются на величину эффективной добавки δ.

Так, для цилиндрического реактора

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H'}\right)^2 + \left(\frac{2{,}405}{R'}\right)^2, \qquad (2.44)$$

где $H' = H + 2\delta$; $R' = R + \delta$.

Для уран-графитовых реакторов с графитовым отражателем

$$\delta = 1{,}2 L_{отр} th \frac{T}{L_{отр}}. \qquad (2.45)$$

Для водо-водяных реакторов с водяным отражателем

$$\delta = 7{,}2 + 0{,}1\left(M^2 - 40\right), \text{ см}, \qquad (2.46)$$

где M – площадь миграции отражателя, см^2.

Толщина отражателя T рассчитывается из следующего соотношения:

$$T = 1{,}5M, \text{ см}. \qquad (2.47)$$

Формулу (2.43) можно использовать для расчёта одногрупповым методом критических размеров, задавая левую часть равной единице.

Для того чтобы реактор был работоспособным, он должен обладать достаточно большим $к_{эф}$.

2.5. Температурные эффекты реактивности

При работе реактора происходит существенное повышение температуры всех материалов активной зоны, отражателя и корпуса реактора.

При повышении температуры повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Повышение температуры приводит к уменьшению плотности материалов вследствие расширения, что ведет к уменьшению числа ядер в единице объема и, следовательно, к уменьшению макросечений. Повышение $T_{н.г.}$ вызывает смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющихся нейтронов в область

больших энергий. Сдвиг энергии «сшивки» приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов.

Повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансов горючего вследствие их теплового движения.

Все это приводит к изменению реактивности реактора.

В большинстве случаев температурный эффект отрицателен, и нагрев реактора сопровождается уменьшением эффективного коэффициента размножения, что влечёт устойчивую работу реактора. Положительный температурный коэффициент приводит к неустойчивости в работе реактора, при котором его состояние переходит в надкритическое.

Распределение температуры по объему реактора изменяется со временем. Однако для многих практических задач с достаточной степенью точности можно считать, что в любой момент времени справедливо установившееся поле температур (квазистационарное приближение).

Рассмотрим понятие температурного эффекта (ТЭР, $\rho_т$) и температурного коэффициента реактивности (ТКР, $\alpha_т$).

ТЭР – интегральная характеристика влияния T на ρ и представляет собой изменение ρ при разогреве или расхолаживании реактора в заданном интервале температур. Изменяется в относительных единицах или процентах:

$$\rho_т = \rho(T_2) - \rho(T_1) = \frac{k_{эф_2} - k_{эф_1}}{k_{эф_1} \cdot k_{эф_2}}. \qquad (2.48)$$

Обычно подразумевается изменение ρ при разогреве от 20 °С до рабочей температуры.

ТКР – дифференциальная характеристика влияния T на ρ и представляет собой изменение ρ при разогреве реактора на 1 °С. Измеряется ТКР в °С$^{-1}$ и обозначается α.

$$\alpha = \frac{\partial \rho}{\partial T_{ср}}, \ °C^{-1},$$

где $T_{ср}$ – среднеинтегральная температура замедлителя.

Так как $\rho = 1 - k_{эф}^{-1}$, то

$$\alpha = \frac{1}{k_{эф}^2} \frac{\partial k_{эф}}{\partial T_{ср}}. \qquad (2.49)$$

Когда $k_{эф} \approx 1$, для практических приложений часто используется удобная зависимость

$$\alpha = \frac{\partial k_{эф}}{\partial T_{ср}}. \qquad (2.50)$$

При эксплуатации $\rho_{\text{т}}$ и $\alpha_{\text{т}}$ удобно разделить на две составляющие, медленно изменяющиеся во времени при изменении температуры и режима работы (изотермические) и быстродействующие, отслеживающие изменение мощности (динамические) [10].

Для удобства расчетов целесообразно выделить компоненту температурного эффекта, обусловленную равномерным нагревом реактора внешним теплом или собственным теплом на достаточно малом уровне мощности (~1 % $N_{\text{ном}}$):

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{т.н.}} = k_{\text{эф}}^{\text{т.н}} - k_{\text{эф}}^{\text{хол}}\left(20^{o}C\right). \tag{2.51}$$

Поэтому изменения эффективного коэффициента размножения $\Delta k_{\text{эфф}}$, обусловленные следующими процессами, будут:

а) нагрев реактора до средней температуры теплоносителя

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{т.н.}} = k_{\text{эф}}^{\text{т.н}} - k_{\text{эф}}^{\text{хол}}\left(20^{o}C\right);$$

б) паровой эффект

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{п}} = k_{\text{эф}}^{\text{п}} - k_{\text{эф}}^{\text{т.н}};$$

в) температурный эффект нагрева замедлителя

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{зам}} = k_{\text{эф}}^{\text{зам}} - k_{\text{эф}}^{\text{хол}};$$

г) мощностной эффект (эффект Доплера)

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{Д}} = k_{\text{эф}}^{\text{г}} - k_{\text{эф}}^{\text{зам}}.$$

Полный температурный эффект равен сумме парциальных эффектов.

Для анализа нестационарных процессов в реакторе необходимо знать температурные и мощностные коэффициенты реактивности, численно равные изменению реактивности при единичном изменении температуры или других отмеченных выше параметров:

– доплеровский $\alpha_{\text{Д}}$, K^{-1} и мощностной α_{TN}, $\%^{-1}$ коэффициенты:

$$\alpha_{\text{Ъ}} = \frac{\Delta\rho_{\text{Ъ}}}{\Delta T};\ \alpha_{\text{TN}} = \frac{\Delta\rho_{N}}{N_{\text{,,,,}}} = \Delta\rho_{N}\cdot 10^{\pm 2}, \tag{2.52}$$

где ΔT – изменение средней температуры топлива при выводе реактора с нулевой на номинальную мощность;

– паровой коэффициент, % пара$^{-1}$:

$$\alpha_{\text{.}} = \frac{\Delta\rho_{\text{.}}}{m_{\text{.}}}, \tag{2.53}$$

где $m_{\text{.}}$ – массовая доля пара в пароводяной смеси на номинальной мощности, %.

К рассмотренным эффектам близки по влиянию на нейтронно–физические процессы аварийные эффекты потери теплоносителя.

В общем случае значение ТКР определяется по формуле

$$\alpha_{\text{т}} = \frac{1}{\eta}\frac{\partial \eta}{\partial T} + \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{\varphi}\frac{\partial \varphi}{\partial T} + \frac{1}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial T} - \frac{B^2}{k_\infty}\frac{\partial M^2}{\partial T} - \frac{M^2}{k_\infty}\frac{\partial B^2}{\partial T}. \qquad (2.54)$$

Таким образом, задача сводится к вычислению зависимостей η, ε, φ, θ, M^2, B^2 от температуры T.

Зависимость поперечных сечений от температуры

Для расчёта реактора при рабочей температуре нужно найти эффективную температуру нейтронов и соответствующие ей новые значения сечений и других параметров реактора.

При расчёте можно принимать, что средняя температура замедлителя равна средней температуре теплоносителя, но это справедливо только для стержневых ТВЭГ. Для твэл других типов это неверно.

Эффективная температура нейтронного газа определяется по формуле

$$T_{эф}^{н.г} = T_{зам}\left(1 + 1{,}4\frac{\overline{\Sigma}_{аяч.}(kT_{зам})}{\xi\overline{\Sigma}_{Sяя.}(kT_{зам})}\right),\ K. \qquad (2.55)$$

Сечения $\overline{\Sigma}_{аяя}$ и $\overline{\xi\Sigma}_{Sяя}$ берутся при температуре замедлителя.

Для определения $T_{эф}$ можно воспользоваться и другими формулами [2, 3, 15, 41, 42].

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\overline{\sigma}_a(T_{н.г}) = 0{,}886\sigma_{a0}\sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}\cdot f_a(T_{н.г})\cdot F(\chi_{гр}), \qquad (2.56)$$

где δ_{ao} – макроскопическое сечение поглощения стандартных нейтронов; $f_a(T_{н.г})$ – поправочный коэффициент, который характеризует отклонение сечения от закона $1/v$. Аналогично можно определить и σ_f.

Обычно зависимость сечения рассеяния σ_S температуры очень слабая.

Эффект, вызываемый изменением плотности твёрдых веществ, невелик и поэтому при расчёте макроскопических сечений этих веществ он обычно не учитывается. Учёт изменения плотности веществ для жидкостей и газов производится по формуле

$$N_T = N_{хол}\cdot\frac{\gamma_{гор}}{\gamma_{хол}}. \qquad (2.57)$$

Удельный вес $\gamma_{гор}$ вещества определяется не по температуре нейтронного газа, а по температуре вещества в реакторе. Кроме того, часто необ-

ходимо знать верхнюю границу тепловой группы. Для тепловых и не очень жёстких промежуточных реакторов границей тепловой группы условно считается точка пересечения спектров Ферми и Максвелла. Эта точка определяется подбором или графически из следующего трансцендентного уравнения:

$$f_{гр}(\chi_{гр}) = \frac{\chi_{гр}^2 e^{-\chi_{гр}}}{1-(1+\chi_{гр})e^{-\chi_{гр}}} = \frac{\Sigma_a(E_{гр}, E_T)}{\xi\Sigma_s}, \qquad (2.58)$$

где $\chi_{гр} = E_{гр}/E_T$; $E_T = k \cdot T_{н.г}$.

В этом случае последовательность расчёта обычно следующая. Определяют температуру нейтронного газа, выбирают пробное значение $\chi_{гр}$ (обычно 5 или 6).

Величины сечений рассчитываются по формуле (2.56) с учётом множителя $F(\chi_{гр})$.

График функции $F(\chi_{гр})$ и $f(\chi_{гр})$ представлен на рис. 2.11–2.12. После этого высчитывается $\Sigma_a(E_{гр}, E_m)$, причём величина $\xi\Sigma_S$ принимается такой же, как и в формуле для нейтронного газа.

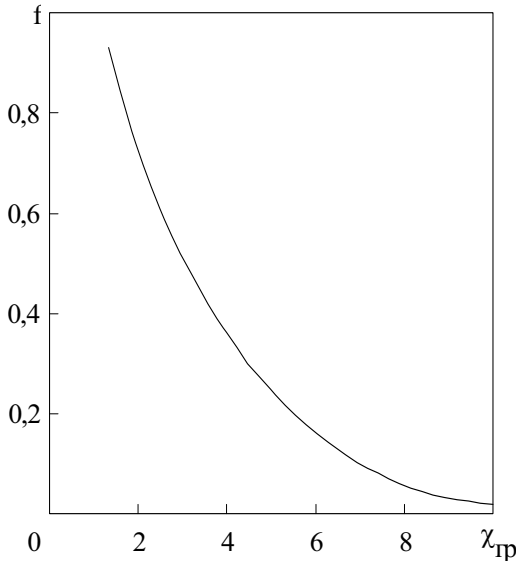


Рис. 2.11. К определению верхней границы тепловой группы

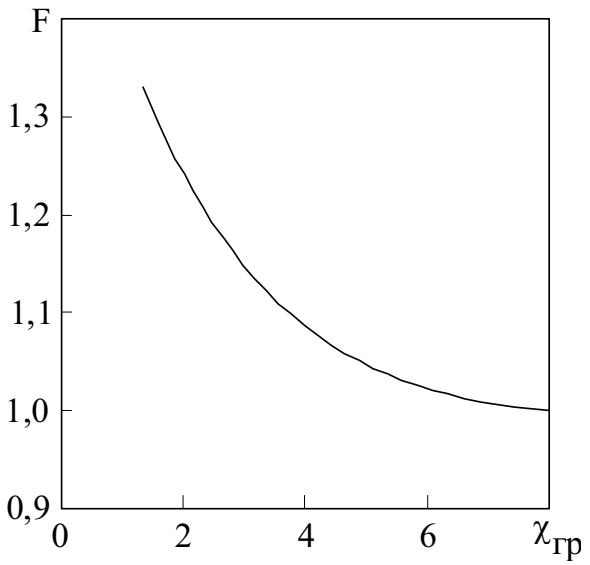


Рис. 2.12. К усреднению сечений поглощения по спектру Максвелла

Для данного отношения $\frac{\Sigma_a(E_{гр}, E_T)}{\xi\Sigma_s}$ проверяется правильность выбора $\chi_{гр}$.

Если наблюдается существенное различие, то расчёт повторяется с новым $\chi_{гр}$. Подсчитав затем E_m по формуле $E_m = 0{,}86 \cdot 10^{-4}\ T_{н.г.}$, по данному $\chi_{гр}$., можно найти $E_{гр}$.

Результаты расчётов сводятся в таблицу, аналогичную таб. 2.11.

После этого необходимо рассчитать K_∞ горячего реактора.

$$k_\infty^{гор} = \eta_{гор} \cdot \varepsilon_{гор} \cdot \varphi_{гор} \cdot \theta_{гор}.$$

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах ε изменяется мало и его можно оставить прежним. Остальные коэффициенты рассчитываются так же, как для холодного реактора. Весь расчёт производится только для оптимального варианта.

Рассмотрим характер изменения основных членов, входящих в выражение для $k_{эф}$.

Величина ε очень мало изменяется с температурой и ей можно пренебречь.

Величина η

Для двух делящихся изотопов U–233 и U-235 наблюдается увеличение η при повышении температуры.

Для природного урана η мало меняется с температурой и ею можно пренебречь.

Величина φ

Вероятность избежания резонансного захвата с повышением T уменьшается, что объясняется увеличением скорости теплового движения ядер урана. При этом возникает доплеровское уширение резонансных уровней. Значение этой величины:

$$\frac{1}{\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial T} = -\,(0{,}5 \div 2)\cdot 10^{-5}\ °C^{-1}.$$

Величина θ

Если бы все сечения подчинялись закону 1/v, то f_i=1 и f_u=1 и относительное поглощение оставалось бы постоянным для любой температуры. Но так как для замедлителя и других конструкционных материалов f=1, а для делящихся веществ $f_u \neq 1$, то с повышением температуры относительное поглощение ${}_0n^1$ во всех материалах, кроме топлива, уменьшается, а величина θ увеличивается. Рассматриваемый эффект особенно велик в реакторах с плутониевым топливом, у которого f заметно отличается от единицы.

Второй эффект – эффект выравнивания нейтронного потока. Сечения поглощения с повышением температуры уменьшаются, диффузионные длины увеличиваются и по мере роста температуры неравномерности распределения нейтронов в топливе и замедлителе сглаживаются. В результате уменьшается коэффициент проигрыша и увеличивается θ (рис. 2.13).

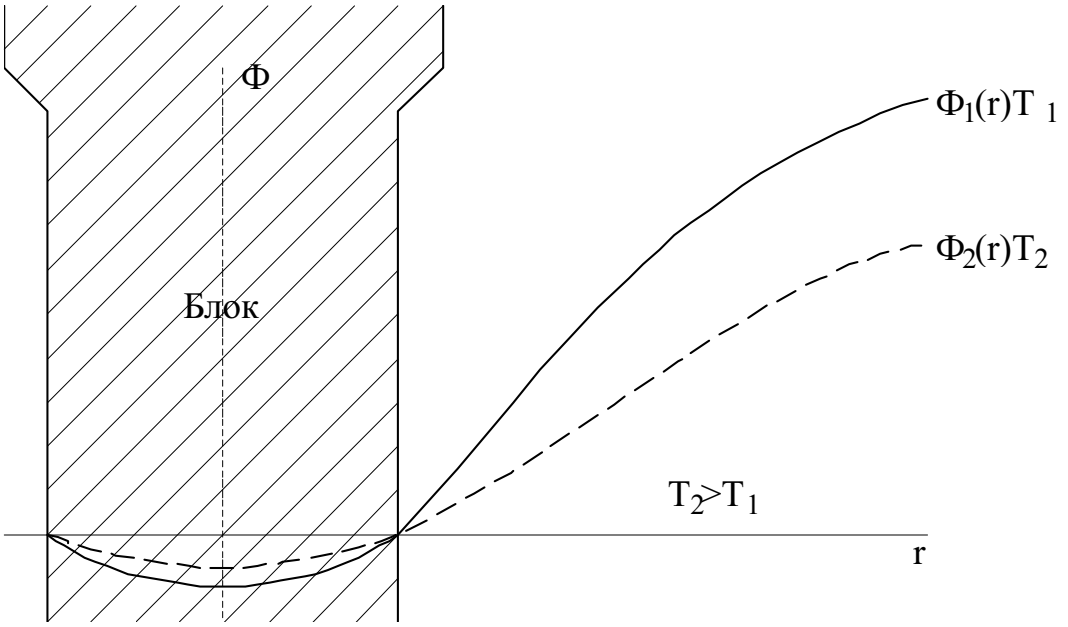


Рис. 2.13. Изменение распределения тепловых нейтронов в зависимости от температуры [1]

Величина $\frac{1}{f}\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)$ для гетерогенных реакторов колеблется в пределах $(2\div5)\cdot10^{-5}\ °C^{-1}$.

Следует отметить, что основной вклад в эту величину вносит эффект выравнивания нейтронного потока. Например, для уран-графитового реактора $\frac{1}{f}\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right) = 5{,}2\cdot10^{-5}\ °C^{-1}$, причем изменение $\frac{\overline{\Phi}_к}{\overline{\Phi}_ц}$ составляет $3{,}9\cdot10^{-5}\ °C^{-1}$, а эффект изменения относительного поглощения $1{,}3\cdot10^{-5}\ °C^{-1}$.

Температура оказывает влияние на реактивность и косвенно – через отравление. Повышение температуры вызывает уменьшение захвата вредными продуктами деления, в результате чего снижается отравление и возрастает реактивность.

В водо-водяных и органо-органических реакторах, работающих по программе с постоянной средней температурой теплоносителя, удобно разделять изменение реактивности с изменение температуры на два этапа.

В период прогрева проявляются все рассмотренные выше эффекты, однако решающее воздействие на характер кривой температурного эффекта оказывает изменение плотности замедлителя-теплоносителя. Поэтому температурный эффект реактивности, отнесенный к периоду прогрева, называют плотностным эффектом.

При работе же реактора на мощности изменение реактивности, в основном, происходит из-за изменения температуры урана (эффект

Доплера). По этой причине Доплер-эффект иногда называют мощностным эффектом реактивности.

Возраст нейтронов в горячем реакторе вычисляется следующим образом:

$$\tau = \tau_{293} \frac{\ln \frac{E_0}{E_{гр}^{T}}}{\ln \frac{E_0}{E_{гр}^{293}}} \cdot \left(\frac{\gamma_{293}}{\gamma_T} \right)^2, \qquad (2.59)$$

где $E_{гр}^{m}$ и $E_{гр}^{293}$ – энергия сшивки при температуре нейтронного газа и 293 К соответственно.

Можно также воспользоваться формулой

$$\tau_{гор} = \tau_{хол} - \frac{1}{3\xi\Sigma_{Sяя}\Sigma_{trяr}} \ln \frac{T_{н.г}}{T_0}, \qquad (2.60)$$

где $T_0 = 293$ К.

Вышеуказанные формулы обычно используются для расчёта возраста нейтронов в реакторе с твёрдым замедлителем.

Возраст тепловых нейтронов в уран-водных решетках может быть определён по экспериментальной формуле С.Н. Фейнберга:

$$\tau = \frac{\tau_{H_2O}}{\left(\gamma_{H_2O} \frac{V_{H_2O}}{V_{яч}} \right) \left[1 - \frac{V_{H_2O}}{V_{яч}} \left(1 - \gamma_{H_2O} \right) \right]^{1,5}}, \qquad (2.61)$$

где τ_{H_2O} – возраст нейтронов воды при комнатной температуре, см^2; γ_{H_2O} – удельный вес воды при рабочей температуре теплоносителя, г/см^3.

Для водо-водяных реакторов τ можно рассчитать по формуле, предложенной Р. Эрлихом и Р. Дэйчем [43], в которой влияние температуры учитывается через изменение плотности воды. Квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора, находящегося в рабочем состоянии, рассчитывается так же, как и для холодного реактора, $L_{зам}^2$ в зависимости от температуры T можно найти по следующей формуле:

$$L_{зам}^2(T) = L_{зам}^2(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48}. \qquad (2.62)$$

Опыт показывает, что наиболее целесообразно поддерживать температуру графитовой кладки в пределах 400÷700 °С.

Эффективный коэффициент размножения для горячего реактора

$$k_{эф}^{гор} = \frac{k_{\infty}^{гор} \cdot e^{-B^2 \tau_{гор}}}{1 + L_{гор}^2 B^2}. \qquad (2.63)$$

Температурный коэффициент реактивности

$$\frac{\Delta k_{эф}}{\Delta T} = \frac{k_{эф}^{гор} - k_{эф}^{хол}}{\Delta T},\ {}^0C^{-1};$$
$$\Delta T = T_{зам} - 20,\ {}^0C. \qquad (2.64)$$

Для каждого ЯР существует своя зависимость реактивности от температуры. График этой зависимости называется кривой температурного эффекта реактивности (рис. 2.14).

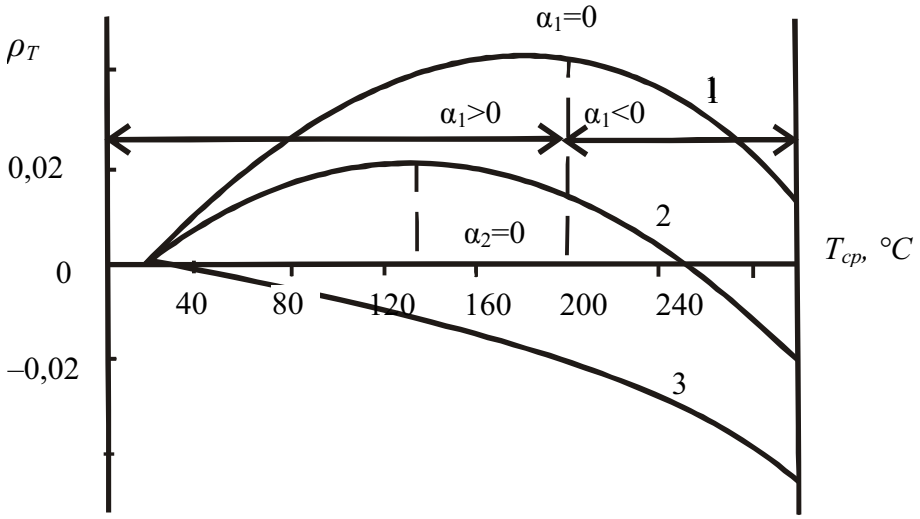


Рис. 2.14. Характерные зависимости ТЭР для различных реакторов

Рабочий уровень $T_{ср}$ всех реакторов составляет 300 °С. ТЭР (1-го) > 0 и равен 1,5 %. ТЭР (2-го и 3-го) < 0 и равен 2 и 4,5 %. Реактор 3 –ТР.

Так, для 1-го ЯР при его разогреве от 20 до 90 °С ρ_1=2,5 %. Так как ТКР есть $\partial\rho / \partial T_{ср}$, а реактивность с изменением изменяется по криволинейному закону, то каждому значению соответствует свой ТКР.

Для 1-го ЯР значение α_1, при увеличении $T_{ср}$ от 20 до 200 °С постоянно уменьшается, оставаясь > 0. Для 2-го ЯР α_2>0 при $T_{ср}$=20÷150 °С и α_2<0 при $T_{ср}$=150÷300 °С. Для 3-го ЯР α_3 во всем диапазоне изменение $T_{ср}$ остается отрицательным.

В тех диапазонах изменения $T_{ср}$, где с удовлетворительной точностью можно линеаризовать кривую ТЭР, существует следующая связь $\rho_T = \overline{\alpha}\Delta T_{ср}$.

В ЯР с борным регулированием ТЭР и ТКР сильно зависят от массовой концентрации борной кислоты [10, 39] (рис. 2.15).

Для больших C_B ТКР>0, что, с точки зрения ядерной безопасности, крайне нежелательно. Причина – уменьшение $\gamma_{H_3BO_3}$ с ростом температуры, уменьшение N_B и ρ растет.

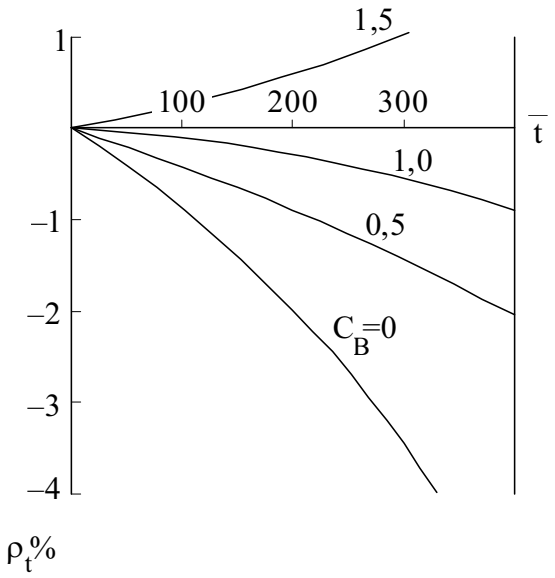


Рис. 2.15. ТЭР ВВЭР–440 при различных концентрациях бора

Ядерный температурный коэффициент реактивности (ЯТКР)

Для удобства анализа температурный коэффициент реактивности обычно разделяют на три части: ядерный температурный коэффициент (ЯТК), определяемый влиянием температуры на эффективные сечения, плотностной температурный коэффициент (ПТК), связанный с изменением плотности материалов активной зоны, и объемный температурный коэффициент, зависящий от изменения объема реактора в целом.

Для анализа ЯТКР разделим на 2 составляющие:

1) эффект, обусловленный изменением температуры замедлителя ($T_з$), приводящий к изменению жесткости спектра тепловых нейтронов;

2) эффект, обусловленный изменением температуры топлива, приводящий к доплеровскому уширению резонансных пиков.

Первая составляющая связана с изменением энергии нейтронов, находящихся в тепловом равновесии с размножающей средой. Увеличение температуры среды (основное значение $T_{зам}$) приводит к смещению спектра тепловых нейтронов в сторону более высоких энергий, сечения уменьшаются, поглощение уменьшается. Вследствие увеличения энергии E_c с ростом T сокращается интервал замедления нейтронов ($E_f - E_c$).

Вторая составляющая ЯТКР относится к промежуточной области энергий и не связана с распределением тепловых нейтронов по энергиям. Чем выше T, тем больше понижение и уширение резонансного пика, что приводит к возрастанию наблюдаемых сечений на крылья резонанса.

Доплер-эффект оказывает влияние только на φ. В динамическом отношении эти эффекты далеко не равнозначны, так как Доплер-эффект определяется только T топлива, а смещение спектра – $T_{зам}$.

Приведем анализ составляющих ЯТКР – в основном двух эффектов:

$$\frac{1}{\varphi}\frac{\partial \varphi}{\partial T_{\text{ср}}};\ \frac{1}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial T_{\text{ср}}}.$$

Известно, что φ гетерогенных реакторов определяется не истинным, а эффективным $\int_{\text{эф}}$, блокированная часть которого существенно зависит от температуры. Количественно эта зависимость определяется коэффициентом пропорциональности *k*:

$$k = 0,775\left(1+17,5\cdot 10^{-3}\sqrt{T_T+273}\right).$$

Поэтому с повышением температуры $\frac{1}{\varphi}\frac{\partial \varphi}{\partial T}<0$.

Зависимость коэффициента использования тепловых нейтронов от температуры удобно проанализировать, рассматривая ячейку, состоящую только из топлива и замедлителя.

Относительное поглощение нейтронов в замедлителе характеризуется параметром $\sigma_{аз}/\sigma_{а5}$. $\sigma_{аз}$ уменьшается пропорционально *1/v*, а $\sigma_{а5}\sim f_{аз}(T_{ср})/v$. Следовательно, при разогреве увеличивается относительное поглощение нейтронов в замедлителе, что уменьшает θ.

Рассматриваемый эффект может быть особенно велик в реакторах с плутониевым топливом, у которого *f* заметно отклоняется от единицы.

Вследствие уменьшения сечений поглощения с ростом температуры замедлителя неравномерность в распределении потока тепловых нейтронов по ячейке уменьшается. Уменьшение $F=\frac{\overline{\Phi}_{\text{т}}}{\overline{\Phi}_{\text{к}}}$ приводит к увеличению θ, примерно на 4 %. $\frac{\sigma_{a\text{к}}}{\sigma_{a5}}$ приводит к уменьшению $\theta\approx 2$ %.

Поэтому величина $\frac{1}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial T}>0$ и для гетерогенных реакторов колеблется в пределах $(2\div 5)\cdot 10^{-5}$ 1/ °С.

С увеличением $T_{\text{н.г.}}$ уменьшается (незначительно) возраст нейтронов и увеличивается длина диффузии. Однако обычно длина диффузии изменяется сильнее, чем возраст, поэтому $\frac{1}{M}\frac{\partial M^2}{\partial T}>0$.

Увеличение температуры нейтронного газа ($T_{\text{н.г.}}$) приводит к увеличению длины диффузии в отражателе. В результате возрастает эффективная добавка и уменьшается геометрический параметр. Следовательно, $\frac{1}{B^2}\frac{\partial B^2}{\partial T}<0$.

Следует отметить, что при рассмотрении ЯТКР необходимо учитывать изменение поглощения нейтронов в Xe, Sm и т. д., изменение эффективности СУЗ.

Плотностной температурный коэффициент реактивности (ПТКР)

Плотностной температурный коэффициент вычисляется при постоянных микроскопических эффективных сечениях и размерах реактора и описывает зависимость реактивности от плотности материалов активной зоны и учитывает только изменение числа ядер в единице объема.

$\frac{1}{\eta}\frac{\partial\eta}{\partial T} = 0$ от плотности не зависит.

$\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial T} > 0$, т. е. ε увеличивается.

При разогреве от 20 до 300 °С изменение в ε не более 1 %.

С увеличением температуры замедлителя, во-первых, увеличивается вероятность для замедляющихся нейтронов испытать столкновение с ядрами топлива и, во-вторых, возрастает роль взаимного замедления блоков.

Согласно $\varphi = \exp\left(\pm\frac{N_{К}}{\xi\Sigma_s}\int_{эф}\right)$, φ обратно пропорционально уран-водному отношению и $T_{ср}$, где $\int_{эф} = \int_{E}^{E_0}\sigma_{\alpha\,эф}\frac{\partial E}{E}$ – эффективный резонансный интеграл.

Обе причины играют тем большую роль, чем теснее решетка, причем первая из них более существенна.

Таким образом, $\frac{1}{\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial T}<0$.

В результате повышения температуры увеличивается уран-водное отношение $\frac{V_{U}N_{U}}{V_{H_2O}N_{H_2O}}$, относительное поглощение в H_2O уменьшается и коэффициент использования тепловых нейтронов увеличивается. Следовательно, $\frac{1}{\theta}\frac{\partial\theta}{\partial T}>0$.

Основное влияние на форму кривой ТЭР оказывает температурная зависимость произведения $\varphi\theta$. Так как $\frac{V_{u}N_{u}}{V_{H_2O}N_{H_2O}}$ прямо пропорциональна $T_{ср}$, то вид функции θ и φ такой же, как $\theta = f\left(\frac{V_{u}N_{u}}{V_{H_2O}N_{H_2O}}\right)$ и $\varphi = f\left(\frac{V_{u}N_{u}}{V_{H_2O}N_{H_2O}}\right)$.

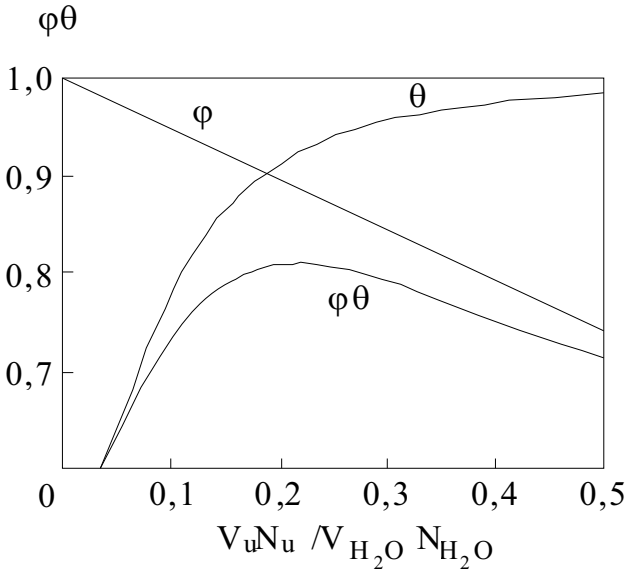


Рис. 2.16. Зависимость от уран-водного отношения

Если состав и геометрия ТВС остаются неизменными, а для получения того или иного типа кривой ТЭР варьируется только шаг решетки ТВС, то есть диаметр эквивалентной ячейки m_0, то:

а) для получения кривых ТЭР (см. рис. 2.14) типа 1 или 2 нужно выбрать такой шаг ТВС, чтобы в холодном состоянии уран-водное отношение было меньше оптимального (<0,2), а после разогрева до рабочего уровня больше оптимального (рис. 2.16);

б) для получения кривой 3 (см. рис. 2.14) нужно выбрать шаг ТВС, чтобы в холодном состоянии уран-водное отношение ≥ оптимальному.

Рассмотрим конкретный пример для реактора ВВЭР-440 [9].

При повышении температуры теплоносителя водо-урановое отношение уменьшается, при этом коэффициент размножения нейтронов может или увеличиваться, или уменьшаться в зависимости от диапазона изменения водо-уранового отношения (см. рис. 2.17. Кривая 1). Если значения водо-уранового отношения при разогреве реактора лежат в диапазоне AC, то коэффициент размножения уменьшается с B до D, а если в диапазоне A'C' – увеличивается с B' до D'. Для обеспечения безопасной работы и саморегулируемости ВВЭР уменьшение выбранного водо-уранового отношения при разогреве активной зоны должно сопровождаться уменьшением $k_{эф}$, т. е. значение водо-уранового отношения должно лежать в области отрицательного температурного коэффициента реактивности.

При наличии борной кислоты в теплоносителе характер зависимости $k_{эф}$ от водо-уранового отношения меняется, а именно максимальное значение $k_{эф}$ смещается в сторону меньших значений водо-уранового отношения и при определенной концентрации борной кислоты выбран-

ный рабочий диапазон изменений этого отношения может перейти в область положительного температурного коэффициента реактивности. Кривая *II* на рис. 2.17 качественно иллюстрирует этот эффект. Если при отсутствии борной кислоты с уменьшением водо-уранового отношения от А к С $k_{эф}$ уменьшается от В к D, то при наличии борной кислоты в воде коэффициент реактивности увеличивается от В" к D".

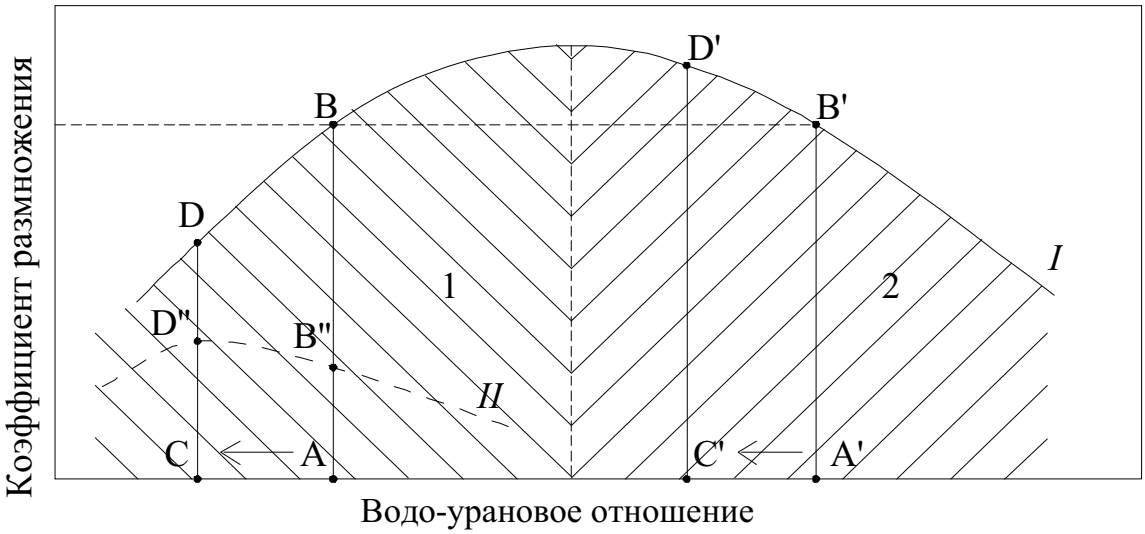


Рис. 2.17. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от водо-уранового отношения топливной решетки: 1 – область отрицательного коэффициента реактивности; 2 – область положительного температурного коэффициента реактивности; кривая I – для чистого теплоносителя; кривая II – для теплоносителя с борной кислотой

Таким образом, водо-урановое отношение для активной зоны ВВЭР выбирают из условия обеспечения устойчивого уменьшения $k_{эф}$ при увеличении температуры воды во всех эксплуатационных режимах.

Мощностной эффект реактивности и мощностной коэффициент реактивности (МЭР, МКР)

Мощностной коэффициент реактивности определяет устойчивость, регулируемость, надежность и безопасность ядерных реакторов. Динамический мощностной коэффициент во всем диапазоне изменения мощности должен быть отрицательным, благодаря чему безопасность реактора можно обеспечить даже при небольшом $\alpha_т < 0$.

В тех случаях, когда теплопроводность топлива мала (UO_2), с увеличением *N* возрастает радиальная неравномерность распределения *T* в элементарной ячейке за счет увеличения *T* в центре твэлов.

МЭР – изменение ρ в результате изменения мощности $N_р$ в заданном диапазоне и при заданном расходе теплоносителя *G*. Обозначается $\rho_{тм}$.

МКР – изменение ρ в результате изменения N_0 на 1 % при заданном расходе теплоносителя $\alpha = \dfrac{\partial \rho}{\partial N_p}$, $\%^{-1}$.

Для каждого реактора, где мощностной эффект существенен, строятся свои кривые МЭР (рис. 2.18).

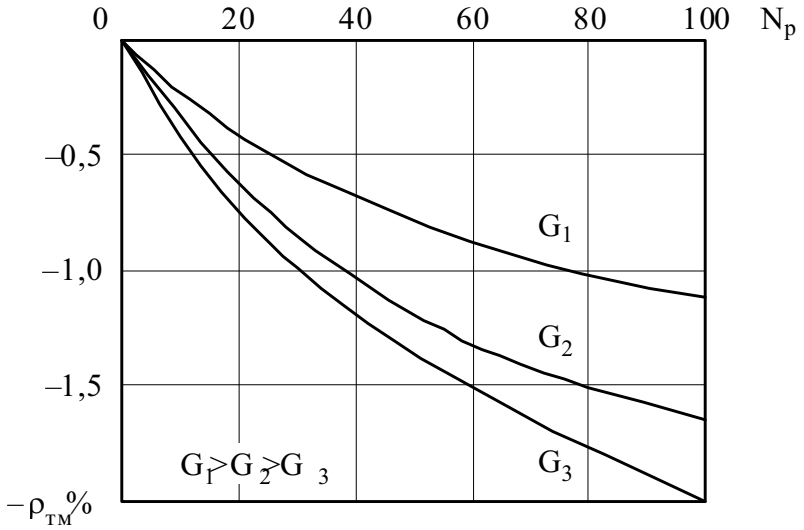


Рис. 2.18. Мощностной эффект реактивности

С увеличением G $\rho_{тм}$ уменьшается, т. к. при этом улучшается теплосъем и снижается $T_{я.т.}$ ВВЭР-440 $\alpha_N = -(1{,}5 \div 1{,}8) \cdot 10^{-3}$ 1/МВт.

В ЯР с высоким обогащением топлива (т. е. с малым содержанием ^{238}U, например БР) Доплер-эффект для делящихся нуклидов (^{235}U, ^{239}Pu), связанный с повышением $T_т$, может преобладать над увеличением поглощения в ^{238}U и МЭР, и МКР будут положительны.

Графики ТЭР и ТКР необходимы оператору для:

1) расчета критического положения органов СУЗ;
2) определения дополнительного энергозапаса в конце кампании;
3) оценки поведения реактора при изменении режима работы с точки зрения саморегулирования и обеспечения ядерной безопасности.

В табл. 2.6–2.9 приведены эффекты реактивности для реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000.

Устойчивость реактора

Для обеспечения устойчивости и безопасности необходимо, чтобы в области рабочих температур ТКР < 0. В этом случае ρ имеет отрицательную обратную связь по температуре и реактор является саморегулируемым.

Следует подчеркнуть, что с точки зрения устойчивости важны знак и значение, именно ТКР, а не ТЭР, который не оказывает никакого влияния на устойчивость.

Таблица 2.6

Коэффициенты реактивности (рабочее состояние, начало кампании) реактора ВВЭР–1000

Параметр	Единицы измерения	Значение
ТКР замедлителя	$°C^{-1}$	$-1{,}5\cdot10^{-4}$
Плотностной коэффициент реактивности замедлителя	$(г/см^3)^{-1}$	0,04
ТКР топлива (Доплер–эффект)	$°C^{-1}$	$-2{,}0\cdot10^{-5}$
Мощностной КР	$\%^{-1}$	$-1{,}4\cdot10^{-4}$

Таблица 2.7

Эффекты реактивности ВВЭР–1000

Наименование	Начало кампании	Конец кампании
Температурный эффект 20–313 °С	0,05	0,057
Мощностной эффект	0,011	0,013
Отравление Xe	0,028	0,036
Отравление Sm	0,006	0,008
Выгорание топлива	0,13	0
Сумма	0,225	0,114

Таблица 2.8

Значения коэффициентов реактивности РБМК

Коэффициент	Среднее выгорание, МВт·сутки/кг	
	5	10
ТКР по графитовому замедлителю, $°C^{-1}$	$3{,}2\cdot10^{-5}$	$5{,}4\cdot10^{-5}$
ТКР по топливу	$-1{,}0\cdot10^{-5}$	$-1{,}1\cdot10^{-5}$
ТКР по воде	$0{,}42\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-5}$
Плотностной коэффициент реактивности $(г/см^3)^{-1}$	$-0{,}22\cdot10^{-2}$	$-1{,}3\cdot10^{-2}$
Паровой коэффициент реактивности	$0{,}15\cdot10^{-2}$	$0{,}92\cdot10^{-2}$

Известно, что все эффекты, кроме доплеровского, являются следствием инерциальных процессов, связанных с изменением температуры замедлителя. Только Доплер-эффект обусловлен изменением $T_т$, которая практически безынерционно следует за мощностью реактора. Так как $\alpha_т$ всегда <0, то она и определяет управляемость реактора даже при небольшом общем положительном ТКР. Тем не менее, лучше иметь $\alpha_т$<0. Наличие +ТКР в области нерабочих температур (см. рис. 2.14, кривая *1* – до 200 °С и кривая 2 – до 150 °С) не создает принципиальных трудно-

стей, так как область температур приходится на разогрев реактора с компенсацией высвобождающейся ρ-органами регулирования.

Таблица 2.9

Коэффициенты реактивности активной зоны

Коэффициент реактивности	Состояние активной зоны	Первая загрузка, Т=3 года/Т=2 года	Стационарный трехлетний топливный цикл
$\frac{\partial \rho}{\partial \bar{t}_{H_2O}}$, 10^{-4} град$^{-1}$	Холодное Горячее Рабочее: начало работы ($N_{тепл}$=100 %) конец работы	–0,100/0,86 –0,50/0,605 –1,00/–0,346 –3,50/–6,30	0,100–(–0,30) –1,00–(–3,50) –1,50–(–4,00)
$\frac{\partial \rho}{\partial \gamma_{H_2O}}$, (г/см^3)$^{-1}$	Холодное Горячее Рабочее: начало работы ($N_{тепл}$=100 %) конец работы	–0,150/–0,126 –0,040/–0,030 –0,040/–0,005 0,160/0,282	–0,13–(–0,04) 0,06–0,15 0,10–0,20
$\frac{\partial \rho}{\partial \bar{t}}$, 10^{-5} град$^{-1}$	Холодное Горячее Рабочее: начало работы ($N_{тепл}$=100 %) конец работы	–3,00/–3,39 –2,50/–3,02 –2,00/–2,69 –2,30/–2,36	–3,00–(–3,50) –2,50–(–3,00) –2,00–(–2,50)
$\frac{\partial \rho}{\partial N}$, 10^{-4} 1/%	Рабочее: начало работы ($N_{тепл}$=100 %) конец работы	–1,40/–2,00 –1,50/–2,90	–(1,2–1,4)÷ – –(1,5–2,0)
$\frac{\partial \rho}{\partial C_B}$, (гВ/кг H_2O)$^{-1}$	Холодное Горячее Рабочее: начало работы ($N_{тепл}$=100 %) конец работы	–0,120/–0,150 –0,095/–0,100 –0,090/–0,105 –0,095/–0,110	–0,095–(–0,105) –0,075–(–0,085) –0,070–(–0,080)

Для подавления возмущений по ρ с минимальным отклонением параметров желателен большой по абсолютной величине –ТКР. В то же время большой –ТКР не всегда приемлем, т. к. он может привести к резкому увеличению ρ и N при внесении возмущений по температуре или расходу теплоносителя. Следовательно, эта типичная оптимизационная задача.

Особое значение ТКР для ВВЭР приобретает при использовании жидкостного борного регулирования. С увеличением концентрации борной кислоты в воде ТКР сдвигается в область положительных значений.

В ВВЭР с ростом паросодержания увеличивается утечка нейтронов. Для редких решеток ТКР может быть положительным из–за влияния параметра θ. В тесных решетках наибольшее влияние ρ на оказывает φ, которая дает отрицательный вклад при увеличении паросодержания.

При работе на мощности N ниже номинальной в случае $\alpha_т<0$ высвобождается $\Delta\rho_N = \alpha_N(N–N_{ном})$, которая может быть использована для получения дополнительного энергозапаса.

Зависимость ρ от температуры в каждом случае имеет свои особенности.

Для ВВЭР кипящего типа определяющим является паровой эффект реактивности $\rho_п$, имеющий отрицательный коэффициент $\alpha_п = \Delta\rho_п/m_п<0$. $\Delta\rho$ – изменение ρ, обусловленное изменением средней плотности теплоносителя на различных уровнях мощности. $m_п$ – массовая доля пара в пароводяной смеси. Рост парообразования уменьшает количество замедлителя в активной зоне снижая ρ и наоборот.

В ядерном реакторе (ЯР) с графитовым замедлителем и H_2O теплоносителем (РБМК) $\alpha_п$ может быть положительным, т. к. изменение доли пара не влияет на замедление нейтронов ($N_с$, определяющая спектр нейтронов, остается постоянной), а поглощение нейтронов в воде уменьшается.

В ЯР с воздушным охлаждением эффект, вызванный тепловым расширением теплоносителя, имеет порядок $2\cdot10^{-5}$ 1/°С. Но здесь необходимо учитывать барометрический эффект (изменение ρ при изменении P). Для воздуха барометрический коэффициент имеет – $(10^{-2}\div10^{-1})$ 1/МПа.

Барометрический эффект для ВВЭР слаб.

2.6. Многогрупповой расчёт, спектр и ценности нейтронов в активной зоне. Подготовка параметров для двухгруппового расчета

Спектр нейтронов в ядерном реакторе представляет собой спектр нейтронного деления, смягчённый эффектами неупругого и упругого замедления на тяжёлых, средних и лёгких ядрах.

Эффективным методом расчёта спектра нейтронов является многогрупповой метод, основная идея которого состоит в том, что вся область энергий нейтронов делится на конечное число интервалов-групп [1, 35, 38].

В пределах каждой группы сечения ядерных процессов считаются независящими от энергии нейтронов.

Предполагается, что для каждой группы могут быть рассмотрены односкоростное кинетическое уравнение в диффузионном приближении и сопряжённое ему уравнение ценности нейтронов, описывающие баланс нейтронов и ценностей в объёме реактора. Проведённый многогрупповой расчёт спектра нейтронов позволяет в дальнейшем получить эффективные двухгрупповые константы.

В дальнейшем будет принята следующая система обозначений:

m – общее число энергетических групп;

k, i, j – текущий индекс группы;

ε_j – доля нейтронов группы «*j*» в спектре деления, $\int \varepsilon(U)dU = 1$;

D – коэффициент диффузии нейтронов, см;

Σ_a, Σ_f – макроскопические сечения поглощения и деления, $см^{-1}$, причём для делящегося изотопа $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c$;

Σ_{tr}^k – транспортное сечение группы «*k*», $см^{-1}$;

$\Sigma_з^k$ – полное сечение замедления группы «*k*» во все нижележащие группы, $см^{-1}$;

$\Sigma_з^{ik}$ – сечение замедления группы «*i*» в группу «*k*», $см^{-1}$;

ν_f^j – выход нейтронов на одно деление в группе «*j*»;

B^2 – геометрический параметр, $см^{-2}$.

Правила использования системы констант

Приведённые системы групповых констант в основном предназначены для расчёта гомогенных систем. Однако описанные способы усреднения сечений позволяют с известным приближением учитывать и гетерогенные резонансные эффекты. Если введение поправок на резонансную самоэкранировку не требуется, то в качестве среднегрупповых непосредственно используются значения, приведённые в [1].

В противном случае эти поправки вводятся следующим образом.

Сначала определяют групповые значения величин $\sigma_{0,l}$:

$$\sigma_{0,l} = \frac{1}{N_l}\sum_{m \neq l} \sigma_{t,m} N_m,$$

где $\sigma_{t,m}$ – полное сечение *m*-го элемента (отличного от рассматриваемого); N_l – концентрация ядер рассматриваемого *l*-го элемента; N_m – концентрация ядер *m*-го элемента.

Обычно в качестве $\sigma_{t,m}$ используют табличные значения. Зная $\sigma_{0,l}$, в дополнительных таблицах находим коэффициенты *f* и далее среднегрупповые значения сечения данного элемента для рассматриваемой среды:

$$\overline{\sigma}_c = \sigma_c f_c(\sigma_0, T);$$
$$\overline{\sigma}_f = \sigma_f f_f(\sigma_0, T);$$
$$\overline{\sigma}_{з(e)}\sigma_з(l) f_l(\sigma_0, T).$$

Здесь f_c, f_f, f_l – коэффициенты, учитывающие влияние резонансной самоэкранировки, соответственно, на среднегрупповые значе-

ния сечения захвата, деления, упругого замедления. Если рассматриваемый элемент присутствует в среде в малой концентрации ($\sigma_0 \to \infty$), то введение поправок не требуется.

Данные поправки необходимы при подготовке сечений для ^{235}U.

Далее определяется сечение замедления, которое складывается из сечения упругого и сечения неупругого замедления.

$$\sigma_з = \sigma_{з(e)} + \sigma_{з(in)};\ \ \sigma_{з(in)i} = \sigma_{in_i} - \sigma_{in}(i,i).$$

Для тяжёлых элементов, когда упругое замедление вызывает переход в одну соседнюю нижнюю группу, суммарные сечения переходов равны:

$$\sigma_з(i,i+1) = \sigma_{з(e)i} + \sigma_{in}(i,i+1),$$

и

$$\sigma_з(i,i+k) = \sigma_{in}(i,i+k),\ \text{для}\ k>1.$$

Для лёгких элементов

$$\sigma_{з(i,i+k)} = \sigma_{e(i,i+k)}.$$

Пример определения данных констант 4 группы для ядер ^{238}U и H: $\sigma_{з(238)} = 0{,}029 + 2{,}25 - 0{,}14$; $\sigma^{3\to4}_{з(238)} = 0{,}027 + 029$; $\sigma^{1\to4}_{з(238)} = 0{,}41$; $\sigma^{2\to4}_{з(238)} = 0{,}46$; $\sigma_{з(H)} = 2{,}28$; $\sigma^{3\to4}_{з(H)} = 0{,}767$; $\sigma^{1\to4}_{з(H)} = 0{,}176$; $\sigma^{2\to4}_{з(H)} = 0{,}375$.

Транспортное сечение определяется следующим образом:

$$\sigma_{tr,i} = \sigma_{e,i}(1-\mu_{e,i}) + \sigma_{ci} + \sigma_{fi} + \sigma_{in_i}.$$

При составлении констант в области тепловых энергий следует производить как усреднение по спектру Максвелла при соответствующей эффективной температуре, так и учёт гетерогенности.

Макроскопические константы с учётом блок-эффекта в распределении тепловых нейтронов усредняются по ячейке по следующим формулам:

$$\Sigma_a = \frac{\Sigma_{a\,зам} S_{зам} + \Sigma_{aф} S_ф \dfrac{\overline{\Phi}_ф}{\overline{\Phi}_{зам}}}{S_{зам} + S_ф \dfrac{\overline{\Phi}_ф}{\overline{\Phi}_{зам}}},$$

$$\Sigma_f = \frac{\Sigma_{fф}}{1 + \dfrac{S_{зам}}{S_ф}\dfrac{\overline{\Phi}_{зам}}{\overline{\Phi}_ф}}.$$

Здесь приняты такие же обозначения, как и при расчёте коэффициента θ – для сложной конструкции ячейки.

При подготовке макроскопических констант в тепловой группе использовать готовые макроскопические сечения для воды [43].

Расчёт спектров в активной зоне

Полный баланс нейтронов и ценностей в активной зоне реактора записывается для *k*-й энергетической группы в следующем виде:

$$J_k - \Sigma_a^k \mathrm{I}^k - \Sigma_з^k \mathrm{I}^k + \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_з^{ik} \mathrm{I}^i + \varepsilon_k \sum_{j=1}^{m} \frac{\nu_f^j \Sigma_f^j \mathrm{I}^j}{\kappa_{эф}} = 0;$$

$$J_k^+ - \Sigma_a^k \mathrm{I}_k^+ - \Sigma_з^k \mathrm{I}_k^+ + \sum_{i=k+1}^{m} \Sigma_з^{ki} \mathrm{I}_i^+ + \frac{\nu_f^k \Sigma_f^k}{\kappa_{эф}} \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j \mathrm{I}_j^+ = 0;$$

$$k = 1,2, \ldots m.$$

Здесь $I^k = \int_v \Phi^k dV$ и $I_k^+ = \int_v \Phi_k^+ dV$ являются интегральными потоками и ценностями нейтронов *k*-й группы в рассматриваемом объёме активной зоны; J_k и J_k^+ – полные утечки нейтронов и ценностей из объёма активной зоны, определяемые для эквивалентного голого реактора по соотношениям:

$$J_k = B^2 D^k \mathrm{I}^k; \; J_k^+ = B^2 D^k \mathrm{I}_k^+,$$

причём для цилиндрической активной зоны

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R_э} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_э} \right)^2.$$

$R_э = R_{аз} + \delta$ – эквивалентный радиус активной зоны с учётом эффективной добавки за счёт отражателя δ.

Групповой коэффициент диффузии в активной зоне

$$D^k = \frac{1}{3\Sigma_{tr\,a.з}^k}.$$

Полное сечение замедления за счёт переходов в нижележащие группы из *k*-й группы

$$\Sigma_з^k = \sum_{i=k+1}^{m} \Sigma_з^{ki}.$$

Расчёт спектров потоков и ценностей в активной зоне ведётся по следующей схеме.

Для потоков

Предполагая геометрический параметр B^2 заданным и, воспользовавшись соотношением

$$\kappa_{эф} = \sum_{j=1}^{m} \nu_f^j \Sigma_f^j \mathrm{I}^j,$$

решим уравнение относительно I^k:

$$\mathrm{I}^k = \frac{\varepsilon_k + \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_з^{ik} \mathrm{I}^i}{\Sigma_{ув}^k + B^2 D^2}.$$

Здесь $\sum_{ув}^{k} = \sum_{a}^{k} + \sum_{з}^{k}$ – полное сечение увода нейтронов из k-й группы. Вычисления производятся начиная с $к$ = I. При этом получаем уравнение с одним неизвестным *1′*, решение которого имеет вид

$$\mathrm{I}^{'} = \frac{\varepsilon_1}{B^2 D^{'} + \Sigma_{ув}^{'}}.$$

Последовательное решение уравнений позволяет находить интегральный поток в каждой группе, используя расчётные потоки для нижележащих групп. Например, для второй группы

$$\mathrm{I}^{2} = \frac{\varepsilon_2 + \Sigma_{з}^{1-2}\mathrm{I}^{'}}{B^2 D^2 + \Sigma_{ув}^{2}}.$$

Для ценностей

Расчёт спектра ценностей производится в обратном порядке, т. е. начиная с $k = m, m\text{-}1, \ldots, 1$, при этом получаем

$$\kappa_{эф} = \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j \mathrm{I}_j^{+}.$$

Разрешая относительно I_k^{+}, имеем:

$$\mathrm{I}_k^{+} = \frac{\nu_f^k \Sigma_f^k + \sum_{i=k+1}^{m} \Sigma_{з}^{ki} \mathrm{I}_i^{+}}{B^2 D^k + \Sigma_{ув}^{k}}.$$

При $k = m$ величина I_k^{+} определяется однозначно:

$$\mathrm{I}_m^{+} = \frac{\nu_f^m \Sigma_f^m}{B^2 D^m + \Sigma_{ув}^{m}}.$$

Далее расчеты ведутся аналогично расчёту потоков. Проверка потоков сводится к проверке выполнения соотношений:

$$\kappa_{эф} = \kappa_{эф}^{+}, \text{ т. е. } \sum_{j=1}^{m} \nu_f^j \Sigma_f^j \mathrm{I}^j = \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j \mathrm{I}_j^{+}.$$

Определение параметров двухгруппового расчёта

Рассчитанные спектры потоков и ценностей нейтронов в активной зоне позволяют составить константы для последующего двухгруппового расчёта пространственного распределения нейтронных потоков.

При этом выделяется тепловая группа – последняя группа из предыдущего расчёта, а все остальные группы объединяются в одну группу быстрых нейтронов, т. е. соответствующие потоки и ценности определяются так:

$$I^T = I^m; \qquad I_T^+ = I_m^+;$$

$$I^б = \sum_{i=1}^{m-1} I^i; \qquad I_б^+ = \sum_{i=1}^{m-1} I_i^+;$$

$$I^б I_б^+ = \left[\sum_{i=1}^{m-1} I^i\right] \sum_{i=1}^{m-1} I_i^+.$$

$$D^б \frac{\sum_{i=1}^{m-1} D^i I^i I_i^+}{\sum_{i=1}^{m-1} I^i I_i^+}; \qquad D^T = D^m; \tag{2.65}$$

$$\Sigma_{ув}^б = \frac{\sum_{k=1}^{m-1} I_k^+ \left[\left(\Sigma_a^k + \Sigma_з^k\right) I^k - \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_з^{ik} I^j\right]}{\sum_{k=1}^{m-1} I^k I_k^+}; \qquad \Sigma_a^T = \Sigma_a^m; \tag{2.66}$$

$$\Sigma_з^{бT} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \Sigma_з^{im} I^i I_k^+}{\sum_{i=1}^{m-1} I^i I_i^+}; \tag{2.67}$$

$$\left(\nu_f \Sigma_f\right)_б = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \nu_f^i \Sigma_f^i I^i I_i^+}{\sum_{i=1}^{m-1} I^i I_i^+}; \qquad \left(\nu_f \Sigma_f\right)_T = \nu_f^m \Sigma_f^m; \tag{2.68}$$

Усреднённые константы рассчитываются по формулам:

$$\tau = \frac{D_б}{\Sigma_{ув}^б - \left(\nu_f \Sigma_f\right)_б}; \qquad L^2 = \frac{D_T}{\Sigma_{aT}}. \tag{2.69}$$

Полученная система двухгрупповых констант используется в дальнейшем для двухгруппового расчёта пространственного распределения нейтронного потока.

2.7. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов. Уточнение $K_{эф}$

Двухгрупповая теория является одним из наиболее широко применяемых методов определения критических условий для реактора с отражателем на тепловых нейтронах. Эта теория чрезвычайно проста по физическому содержанию и этим выгодно отличается от гораздо более сложных методов, которые требуют чрезвычайно больших затрат времени или применения быстродействующих вычислительных машин. Методика двухгруппового расчёта изложена в литературе [3, 4, 13, 29, 36–38, 41, 42].

Уравнение баланса быстрых и тепловых нейтронов для активной зоны имеет вид

$$D_T\nabla^2\Phi_T - \Sigma_{aT}\Phi_T + \varphi\Sigma_б\Phi_б = 0;$$
$$D_б\nabla^2\Phi_T - \Sigma_б\Phi_б + \frac{k_\infty}{\varphi}\Sigma_{aT}\Phi_T = 0; \qquad (2.70)$$
$$\Sigma_б = \frac{D_б}{\tau}; \qquad \Sigma_{aT} = \frac{D_б}{L_T^2}.$$

Для тех зон реактора, где нет горючего (например, отражатель), в уравнениях следует приравнивать нулю члены, содержащие k_∞.

Общие решения уравнений (2.70) для двухзонного реактора (активная зона + отражатель) могут быть представлены так:

а) активная зона

$$\Phi_б = AJ_0(\mu r) + BI_0(\nu r),$$
$$\Phi_T = S_1AJ_0(\mu r) + S_2BI_0(\nu r); \qquad (2.71)$$

б) отражатель

$$\Phi_б = CZ_2,$$
$$\Phi_T = DZ_1 + S_з CZ_2, \qquad (2.72)$$

где A, B, C, D – постоянные; $J_0(\mu r)$, $I_0(\nu r)$ – функции Бесселя нулевого порядка действительного и мнимого аргумента соответственно; $Y_0(\mu r)$ – функция Неймана нулевого порядка; $k_0(ar)$ – функция Макдональда нулевого порядка. Здесь приняты следующие обозначения:

$$\mu = \sqrt{\chi_1^2 - \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}; \qquad a_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{отр}^2} + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}; \qquad (2.73)$$

$$\nu = \sqrt{\chi_2^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}; \qquad a_2 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{отр}} + \left(\frac{\pi}{H}\right)}; \qquad (2.74)$$

$$\chi^2_{1,2} = \mp\frac{1}{2}\left(\frac{1}{L_{а.з}^2} + \frac{1}{\tau}\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{L_{а.з}^2} + \frac{1}{\tau}\right)^2 + \frac{k'_\infty - 1}{L_{а.з}^2\tau}}; \qquad (2.75)$$

$$S_1 = \frac{D_б\varphi}{\tau D_T}\cdot\frac{1}{\frac{1}{L_{а.з}^2} + \chi^2_1}; \qquad S_2 = \frac{D_б\varphi}{\tau D_T}\cdot\frac{1}{\frac{1}{L_{а.з}^2} - \chi^2_2}; \qquad (2.76)$$

$$S_3 = \frac{D_{б.отр}L_{отр}^2}{D_{Тотр}\left(\tau_{тр} - L_{отр}^2\right)}; \qquad R_{экв} = R_{а.з} + T; \qquad (2.77)$$

$$z = \left[I_0(ar) - \frac{I_0}{k_0}(aR_{экв}) k_0(ar) \right]. \qquad (2.78)$$

Условия «сшивки» потоков и токов на границе между активной зоной и отражателем приводят к системе из четырёх уравнений с 4 неизвестными коэффициентами *A*, *B*, *C*, *D*.

Для совместного решения этих уравнений необходимо и достаточно, чтобы определитель, составленный из коэффициентов при *A*, *B*, *C*, *D*, обратился в нуль.

$$\begin{vmatrix} J_0(\mu R_{а.з}) & I_0(\nu R_{а.з}) & -z_2(a_2 R_{а.з}) & 0 \\ S_1 J_0(\mu R_{а.з}) & S_2 I_0(\nu R_{а.з}) & -S_3 z_2(a_2 R_{а.з}) & -z_1(a_1 R_{а.з}) \\ D_{б\,а.к} J_0'(\mu R_{а.з}) & D_{б\,а.к} I_0'(\nu R_{а.з}) & -D_{б\,отр} z_2^1(a_2 R_{а.з}) & 0 \\ S_1 D_{б\,а.з} J_0'(\mu R_{а.з}) & S_2 D_{Т\,а.к} I_0'(\nu R_{а.з}) & -S_3 D_{Т\,а.к} z_2^1(a_2 R_{а.з}) & -D_{Т\,отр} z_1^1(a_1 R_{а.з}) \end{vmatrix} = 0$$

Если требуется определить критический размер реактора при данном составе активной зоны и заданной толщине отражателя, необходимо менять размеры активной зоны до тех пор, пока определитель не обратится в нуль.

Для определения $k_{эф}$ реактора с заданными размерами и свойствами в исходных двухгрупповых уравнениях k_∞ заменяют на $k_\infty' = k_\infty / k_{эф}$ и решают задачу с k_∞'. Затем изменяют значения до тех пор, пока определитель не обратится в нуль. Найдя значение k_∞', при котором определитель обратится в нуль, вычисляется $k_{эф} = k_\infty / k_\infty'$.

Двухгрупповой расчёт выполняется для «холодного» реактора.

Прямой аналитический метод определения $k_{эф}$ (критического радиуса) методом двух групп является достаточно громоздким. Для решения этой задачи разработана программа *DET1*.

При определении коэффициента диффузии D_d на практике часто используют коэффициент диффузии, вычисленный для нейтронов энергии E = I эВ, считая, что он близок к среднему, поскольку сечения рассеяния большинства веществ имеют в области E>1 эВ, плато, простирающиеся вплоть до нескольких десятков килоэлектронвольт.

При оценке коэффициента неравномерности потока тепловых нейтронов можно воспользоваться следующей приближенной формулой:

$$k_{z_{ср}} = \frac{1{,}57}{1 + \frac{2\delta}{H}}; \quad k_{r_{ср}} = \frac{2{,}31}{1 + \frac{2\delta}{R}},$$

где *H*, *R*. – высота и радиус активной зоны с учётом эффективной добавки.

При необходимости расчёт k_z и k_r можно уточнить по более точным формулам [41].

Расчет производится с использованием пакета прикладных программ, реализованного на ПЭВМ. Исходные данные вводятся с клавиатуры и размещаются в программе с помощью пользовательского интерфейса. В число исходных данных входят:

- радиус активной зоны, см;
- высота активной зоны, см;
- толщина отражателя, см;
- эффективная добавка за счет отражателя, см;
- коэффициент диффузии в активной зоне для быстрых нейтронов;
- коэффициент диффузии в активной зоне для тепловых нейтронов;
- коэффициент диффузии в отражателе для быстрых нейтронов;
- коэффициент диффузии в отражателе для тепловых нейтронов;
- вероятность избежать резонансного захвата;
- возраст нейтронов в активной зоне, см^2;
- возраст нейтронов в отражателе, см^2;
- квадрат длины диффузии в активной зоне, см^2;
- квадрат длины диффузии в отражателе, см;
- также потребуется ввод значения радиуса поглощающего стержня, см.

В результате расчетов получаются радиальные распределения плотности потоков быстрых и тепловых нейтронов (отн. ед.), значения k_∞' для случая без поглощающего стержня в активной зоне и со стержнем. Последние требуются при расчете $k_{эф}$ реактора и параметров системы регулирования.

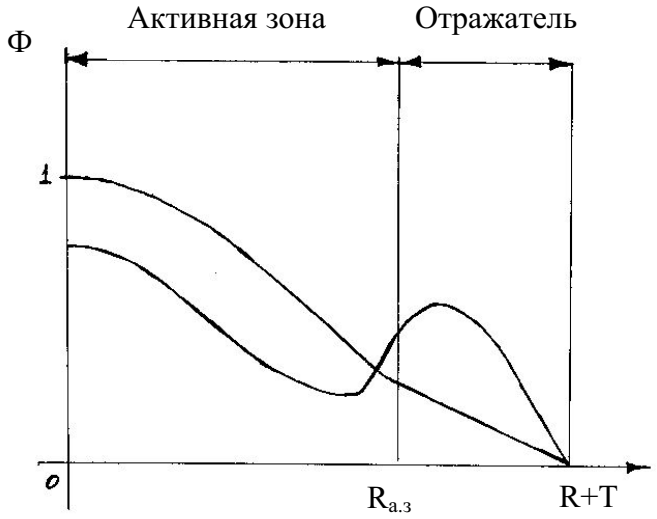


Рис. 2.19. Распределение $Ф_т$ и $Ф_б$ в реакторе с отражателем

После определения величины критического параметра можно с помощью решений (2.71), (2.72) найти пространственное распределение потоков быстрых и тепловых нейтронов в реакторе.

Полагая $A = 1$, найдем соответствующие значения коэффициентов B, C, D.

Поток тепловых нейтронов имеет второй максимум в отражателе или вблизи его. Этот «всплеск» потока объясняется тем, что в отражателе идет интенсивное образование тепловых нейтронов в результате замедления быстрых, пришедших из активной зоны. При этом поглощение тепловых нейтронов здесь незначительно. В активной же зоне вблизи от границы с отражателем скорость образования тепловых нейтронов приблизительно такая же, и здесь велико их поглощение (рис. 2.19).

2.8. Предварительный расчёт системы органов регулирования

Регулирование тепловых реакторов осуществляется чаще всего с помощью стержней, сильно поглощающих нейтроны, которые вводятся в реактор для компенсации избыточной реактивности. В процессе работы запас реактивности падает (отравление, шлакование, выгорание топлива) и поэтому необходимо освобождать скомпенсированный запас реактивности, выводя стержни из реактора.

Компенсирующая способность стержня характеризуется разностью

$$\Delta k = k_{эф} - k_{эф.ст},$$

где $k_{эф}$ – коэффициент размножения со стержнем.

Эффективность стержня зависит от размеров и формы стержня, поглощающей способности материалов стержня, места введения стержня в реакторе и от размеров и физических характеристик самого реактора. Обычно компенсирующая способность одного стержня невелика и, чтобы скомпенсировать весь запас реактивности, требуется размещение большого количества стержней.

Рассмотрим общий подход при определении эффективности системы регулирования в двухгрупповом диффузионном приближении. Наличие отражателя будем учитывать эффективной добавкой $\delta \cdot R_{экв} = R_{а.з} + \delta$. Вначале проводят расчёт стержня, помещенного в центр реактора (вдоль его вертикальной оси).

Решение диффузионного уравнения со стержнем в центре имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi_б &= A_1 J_0(\mu r) + B I_0(\nu r) + C Y_0(\mu r) + D k_0(\nu r), \\ \Phi_Т &= S_1 A_1 J_0(\mu r) + S_2 B I_0(\nu r) + S_1 C Y_0(\mu r) + S_2 D k_0(\nu r). \end{aligned} \qquad (2.79)$$

На поверхности стержня задаются следующие граничные условия:

$$\frac{1}{\Phi_б}\frac{\partial \Phi_б}{\partial r}\bigg|r = r_0 = \frac{1}{3\gamma_б D_б}, \tag{2.80}$$

$$\frac{1}{\Phi_T}\frac{\partial \Phi_T}{\partial r}\bigg|r = r_0 = \frac{1}{3\gamma_T D_T}. \tag{2.81}$$

Поскольку учёт поглощения промежуточных нейтронов в стержнях связан с довольно трудоёмким усреднением функции $1/\gamma(E)$, предположим, что стержень поглощает только тепловые нейтроны, является для них абсолютно черным. По отношению к быстрым нейтронам он является «прозрачным». Следовательно, правая часть уравнения (2.80) будет равна нулю.

γ_T – показатель «черноты» для тепловых нейтронов, который является функцией радиуса цилиндрического стержня и среднего макроскопического транспортного сечения нейтронов в активной зоне.

Расчёт величины γ необходимо проводить в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [2–4, 29, 41, 42] (рис. 2.20).

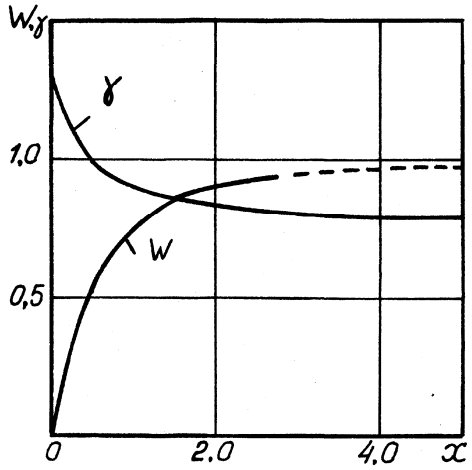


Рис. 2.20. К расчету компенсирующей способности стержней: для $\gamma x=\Sigma_{тр}r_c$; для $W x=\Sigma^{c} r_c$

Используя обычные граничные диффузионные условия $\Phi_T\left(R_{экв}\right)=0$ и условия (2.80), (2.81), получаем систему однородных уравнений относительно неизвестных *A*, *B*, *C*, *D*. Эта система имеет решение, если определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных, равен нулю.

$$\begin{vmatrix} J_0(\mu R_{экв}) & I_0(\nu R_{экв}) & Y_0(\mu R_{экв}) & k_0(\nu R_{экв}) \\ S_1 J_0(\mu R_{экв}) & S_2 I_0(\nu R_{экв}) & S_3 Y_0(\mu R_{экв}) & S_2 k_0(\nu R_{экв}) \\ J_0(\mu r_c) & I_0(\nu r_c) & Y_0(\mu R_{экв}) & k_0(\nu R_c) \\ S_1 q_1^{\gamma} & S_2 q_2^{\gamma} & S_1 q_3^{\gamma} & S_2 q_4^{\gamma} \end{vmatrix} = 0. \tag{2.82}$$

Здесь

$$R_{экв} = R_{а.з} + \delta;$$
$$q^{\gamma}_1 = 3\gamma_T D_T J_0'(\mu r_c) - J_0(\mu r_c);$$
$$q^{\gamma}_2 = 3\gamma_T D_T I_0'(\mu r_c) - I_0(\mu r_c);$$
$$q^{\gamma}_3 = 3\gamma_T D_T Y_0'(\mu r_c) - Y_0(\mu r_c);$$
$$q^{\gamma}_4 = 3\gamma_T D_T k_0'(\mu r_c) - k_0(\mu r_c),$$

где r_c – геометрический радиус поглощающего стержня.

При определении компенсирующей способности стержня необходимо воспользоваться разработанной программой DET2.

Дальнейший ход решения следующий:

1. Задаются несколькими значениями $k'_{\infty} = k_{\infty}/k_{эф}$.
2. При этих значениях определяют необходимые для расчёта параметры.
3. Графическим способом определяют, при каком значении определитель $\Delta = 0$.

Значение $k^{ст}_{эф}$ определённое из $k'^{ст}_{\infty}$ при $\Delta = 0$ и является искомым значением $k^{ст}_{эф}$ для реактора со стержнем.

Стержень, проставленный эксцентрично, имеет меньшую компенсирующую способность по сравнению с таким же стержнем в центре активной зоны. Из элементарной теории возмущений приближенно следует, что стержень, помещенный на расстоянии R_i от центра, имеет компенсирующую способность

$$\Delta k_i = \Delta k_0 J_0^2(\mu R_i). \qquad (2.83)$$

Общая компенсирующая способность системы стержней

$$\sum_i \Delta k_i = \Delta k_0 \sum_i J_0^2(\mu R_i). \qquad (2.84)$$

Если известна Δk_0 полный запас реактивности, то число регулирующих стержней будет равно:

$$N_{рег} = \frac{\ln k_{эф}}{\Delta k_0 \left[J_0^2(\mu R) + J_1^2(\mu R)\right]}. \qquad (2.85)$$

Здесь R – радиус активной зоны.

После того, как в проектируемом реакторе намечено положение каждого стержня, компенсирующая способность системы стержней можно уточнить по формуле (2.84).

При больших значениях $k_{эф}$ возникает необходимость в применении выгорающих поглотителей. Выгорающие поглотители позволяют свести до минимума число подвижных ПС, увеличить первоначальную

нагрузку. Особенности компенсации реактивности выгорающими поглотителями приведены в работах [15, 28, 42].

На первоначальной стадии проектирования ограничимся рассмотрением компенсации реактивности с помощью гомогенного размещения поглотителя в топливе. В этом случае выполняют расчет необходимой концентрации ВП.

Уменьшение ρ при введении в активную зону ВП определяется следующим образом:

$$\rho_{ВП} = -\frac{\Theta \cdot \sigma_{aВП} \cdot N_{ВП}}{\Sigma_{aU}}. \qquad (2.86)$$

Для компенсации $\rho_{вп} = \rho_{выг} + \rho_{шл}$ необходимо иметь в активной зоне следующее количество ВП:

$$m_{ВП} = \frac{N_{ВП} \cdot A_{ВП} \cdot V_U}{6,023 \cdot 10^{23}}, \text{г}. \qquad (2.87)$$

При $V_U \neq V_{ВП}$ необходимо V_U заменить на $V_{ВП}$.

Если требуется уточнить характер изменения реактивности, а также концентрации топлива и выгорающего поглотителя от времени, то необходимо воспользоваться следующим соотношением:

$$N_{ВП}(t) = N^0_{вп}\left[\frac{N_5(t)}{N^0_5}\right]\frac{\sigma_{ВП}}{\sigma_{a5}}, \qquad (2.88)$$

где $N^0_{ВП}$ – концентрация ядер выгорающего поглотителя в начале кампании.

В отличии от ранее выполненного расчета реактора без поглотителя в данном случае в расчетные формулы для θ и L^2 добавляется значение $\Sigma_{aВП}$.

Все остальные характеристики практически не меняются. В случае жидкостного (борного) регулирования расчет необходимого количества раствора (обычно 10 %) борной кислоты H_3BO_3 проводят следующим образом:

$$N_B = -\rho_B \frac{\Sigma_{aU} \cdot V}{\theta \cdot \sigma_{aB} \cdot V_{вод}}, \qquad (2.89)$$

где V – объем активной зоны, м^3; $V_{вод}$ – объем воды в активной зоне, м^3.

Для обеспечения такой концентрации B в активной зоне необходимо, чтобы такая концентрация его была во всем контуре:

$$m_B = \frac{N_B \cdot A_B \cdot V_k}{6,023 \cdot 10^{23}}, г, \qquad (2.90)$$

где V_k – объем I контура воды.

Масса борной кислоты, содержащей $m_в$ граммов бора, определяется из соотношений:

$$\frac{m_{H_3BO_3}}{m_B} = \frac{61{,}83}{10{,}81};\ m_{H_3BO_3} = 5{,}72 \cdot m_B .$$

Особенности компенсации реактивности выгорающим поглотителем и их расчет приведены в работах [2, 4, 10, 18, 28]

$$m_{10\%H_3BO_3} = \frac{m_{H_3BO_3}}{0{,}1}.$$

Так, в работе [4] предлагается следующая последовательность расчета массы выгорающего поглотителя:

определяется значение коэффициента топливного использования, которое необходимо обеспечить на начало компании «холодного» реактора:

$$\theta_{необх}^{н.к.хол} = \frac{k_{эф.необх}^{н.к.хол} \cdot \theta^{н.к.хол}}{k_{эф}^{н.к.хол}}, \qquad (2.91)$$

где используются расчетные значения без выгорающего поглотителя.

В зависимости от размещения ВП рассчитывают по величине $\theta^{н.к.хол}$ значение $\Sigma_{aВП}$, считая, что все остальные величины остаются неизменными. В результате необходимое количество ВП будет равно:

$$m_{ВП} = \frac{\Sigma_{aBB}}{\sigma_{aВП}} \cdot \frac{A}{6{,}023 \cdot 10^{23}} \cdot V_{ВП}, \qquad (2.92)$$

где A и $V_{ВП}$ – соответственно атомный вес поглотителя и суммарный объем, занятый в активной зоне элементами, содержащими поглотитель, см^3.

3. ПАРАМЕТРЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ НЕЙТРОННО-ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Эффекты реактивности при отравлении реактора

В результате деления ядер урана и плутония образуются разнообразные ядра – осколки деления и продукты их распада, которые принято делить на две группы. К первой группе относятся ядра ксенона-135 (^{135}Xe) и самария-149 (^{149}Sm), имеющие большие сечения поглощения тепловых нейтронов. Уменьшение реактивности в результате накопления ядер ^{135}Xe и ^{149}Sm называется отравлением.

Отравление ^{135}Xe имеет особо важное значение в переходных процессах.

Ко второй группе относят стабильные и долгоживущие изотопы.

Уменьшение реактивности реактора в результате накопления осколков второй группы получило название шлакование реактора.

Изотоп ^{149}Sm является стабильным и должен быть отнесен к шлакам. Однако вследствие большого сечения поглощения и высокой концентрации ^{149}Sm по характеру воздействия на реактивность приближается к ^{135}Xe и будет рассмотрен особо.

Рассмотрим пять основных эффектов реактивности, связанных с отравлением ксеноном и самарием:

1. Равновесное, или стационарное, отравление *Xe*:

$$\Delta\rho_{0Xe} = \rho(N_{0Xe}) - \rho_0, \tag{3.1}$$

где N_{0Xe} – стационарная ядерная концентрация ксенона; $\rho(N_{0Xe})$, ρ_0 – реактивность реактора с ксеноном и без ксенона, соответственно.

2. Максимальное избыточное сверх равновесного отравление ксеноном после остановки реактора:

$$\Delta\rho_{Xe}^{\text{макс}} = \rho(N_{Xe}^{\text{макс}}) - \rho(N_{0Xe}), \tag{3.2}$$

где $N_{Xe}^{\text{макс}}$ – максимальная концентрация ксенона после его полной остановки с номинального уровня мощности.

3. Стационарное отравление самарием:

$$\Delta\rho_{0Sm} = \rho(N_{0Sm}) - \rho_0. \tag{3.3}$$

4. Максимальное избыточное отравление самарием после остановки – прометиевый провал реактивности:

$$\Delta\rho_{Sm}^{макс} = \rho(N_{Sm}^{макс}) - \rho(N_{0Sm}). \tag{3.4}$$

5. Уменьшение и увеличение реактивности после переходов реактора с одного уровня мощности на другой.

Уменьшение реактивности, ρ, обусловленное поглощением нейтронов в сильных поглотителях, характеризуется величиной отравления – отношением количества поглощений в поглотителе к количеству поглощений в топливе:

$$q_{\text{отр}} = \frac{(\overline{\Phi}\Sigma_a V)_{погл}}{(\overline{\Phi}\Sigma_a V)_{\text{топл}}}. \tag{3.5}$$

Для поглотителей, находящихся непосредственно в топливе, $V_{\text{топл}}=V_{\text{погл}}$, $\overline{\Phi}_{\text{топл}}=\overline{\Phi}_{\text{погл}}$ и поэтому

$$q_{отр} = \frac{\Sigma_{апог}}{\Sigma_{аттоп}} = \frac{\sigma_{апог}}{\sigma_{аттоп}}\frac{N_{погл}}{N_{\text{топл}}}, \tag{3.6}$$

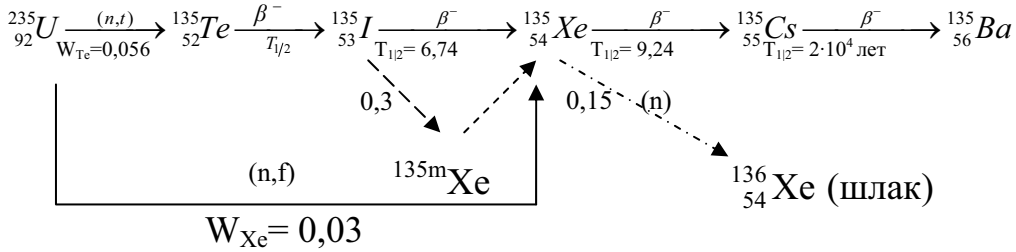
где $N_{\text{погл}}$ и $N_{\text{топл}}$ – концентрация поглотителя и топлива, ядер/см^3.

Для реактора на тепловых нейтронах потеря реактивности за счет отравления

$$\rho_{отр} = -\theta\, q_{отр}, \tag{3.7}$$

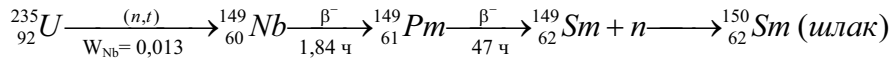
где q – коэффициент использования тепловых нейтронов неотравленного реактора.

Изотоп $^{135}_{54}$Xe образуется в реакторе, в основном, по следующей цепочке:



(3.8)

Изотоп $^{149}_{62}$Sm образуется по цепочке



Характеристики нуклидов вышеуказанных цепочек приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики нуклидов

Нуклид	w_i, Ядро/деление	$T_{1/2}$, ч	λ, $с^{-1}$	$\sigma_а$, $см^2$
^{133}I	0,056	6,7	$2{,}87\cdot10^{-5}$	0
^{133}Xe	0,003	9,2	$2{,}11\cdot10^{-5}$	$2{,}75\cdot10^{-18}$
^{149}Pm	0,013	47,0	$3{,}85\cdot10^{-6}$	0
^{149}Sm	0	–	–	$5{,}92\cdot10^{-20}$

Стационарное отравление ксеноном

С момента пуска реактора происходит интенсивное накопление ядер ^{135}Xe. Это объясняется тем, что пока концентрация ксенона мала, скорость его убывания также невелика и меньше скорости образования ядер ксенона. Однако по мере накопления ксенона скорость его убыли постоянно увеличивается и при работе на постоянной мощности наступает равновесие между образованием и убылью ксенона.

Отравление реактора, отвечающее равновесной концентрации ксенона, называется стационарным.

Баланс ядер ^{135}I и ^{135}Xe в реакторе описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN_I}{dt} = w_I \Sigma_{fu} \Phi - \lambda_I N_I ; \tag{3.10}$$

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = w_{Xe} \Sigma_{fu} \Phi + \lambda_I N_I - \sigma_{Xe} N_{Xe} \Phi - \lambda_{Xe} N_{Xe} ,$$

где N_I, N_{Xe} – концентрация ядер I и Xe, соответственно, $см^{-3}$; w_{Xe}, w_I – выход ксенона и йода на одно деление тяжелого изотопа; Σ_{fu} – макроскопическое сечение деления урана, $см^{-1}$; Φ – плотность потока тепловых нейтронов, нейтрон/($см^2$·с); λ_I, λ_{Xe} – постоянные распада йода и ксенона, $с^{-1}$; σ_{Xe} – микроскопическое сечение поглощения нейтронов изотопом ^{135}Xe, $см^2$.

Плотность потока тепловых нейтронов по реактору:

$$\Phi = \frac{3{,}1\cdot10^{13} N}{\Sigma_f V}, \text{ нейтрон/(см2·с)}, \ \Sigma_f V = 1{,}5 m_5 , \tag{3.11}$$

где m_5 – масса урана-235 в г, N – в кВт,

$$\Phi = 2{,}34\cdot10^{10} \sqrt{\frac{T_{н.г.}}{293}} \cdot \frac{P}{C_5} ,$$

где P – удельная мощность на 1 т урана, МВт/т.

Стационарная концентрация I прямопропорциональна мощности реактора (плотности потока Φ):

$$N_{0I} = w_I \Sigma_{fu} \Phi / \lambda_I \text{, ядер/см3,} \tag{3.12}$$

где w_I – удельный выход I; λ_I – постоянная распада; Σ_{fu} – макроскопическое сечение деления топлива, см$^{-1}$.

Стационарная концентрация *Xe* определяется равновесием между скоростью прибыли Xe из распадающегося I и непосредственно как осколка деления и скоростью убыли его вследствие радиоактивного распада и поглощения нейтронов:

$$N_{0Xe} = \frac{(w_I + w_{Xe})\Sigma_{f_U} \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi}. \tag{3.13}$$

Временем установления равновесной концентрации I и *Xe* при практических расчетах можно считать время, когда их концентрация достигает значения 90 % равновесного, что в данном случае составляет 35÷40 ч работы на стационарной мощности.

Накопление ядер I и *Xe* после пуска реактора происходит по экспоненциальному закону:

$$N_I(t) = N_{0I}(1 - e^{-\lambda_I t}); \tag{3.14}$$

$$N_{Xe}(t) = N_{0Xe}\left\{1 - \exp\left[-\left(\lambda_{Xe} + \Phi\sigma_{Xe}\right)t\right]\right\} - \frac{N_{0I}}{\frac{(\lambda_{Xe} + \Phi\sigma_{Xe})}{\lambda_I} - 1} \times$$

$$\times\left\{\exp(-\lambda_I t) - \exp\left[-\left(\lambda_{Xe} + \Phi\sigma_{Xe}\right)t\right]\right\},$$

где t – время после пуска реактора, ч.

Потеря реактивности при отравлении *Xe* в любой момент времени t до установления стационарного значения определяется из соотношений:

$$\rho_{0Xe}(t) = \rho_{0Xe}\left[0{,}4e^{-10^{\pm 4}t} + \left(1 - 1{,}4e^{-2{,}9\cdot 10^{-5}t}\right)\right], \tag{3.15}$$

где $\rho_{0Xe} = -\theta \frac{(w_I + w_{Xe})}{(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe}\Phi)} \sigma_{Xe} \frac{\Sigma_{f_U}}{\Sigma_{a_U}} \Phi$.

Видно, что стационарное отравление *Xe* зависит от сечения поглощения нейтронов, обогащения топлива и плотности потока нейтронов.

При больших нейтронных потоках (Φ>10^{14} нейтрон/см^2·с) не зависит от Φ:

$$\rho_{0Xe}^{\text{макс}} = -\theta(w_I + w_{Xe}) \frac{\Sigma_{f_U}}{\Sigma_{a_U}}. \tag{3.16}$$

Для чистого урана-235 $\rho_{0Xe}^{\text{макс}} = \pm 5\%$.

Для реакторов на тепловых нейтронах зависимость (3.15) от мощности имеет вид, представленный на рис. 3.1, 3.2.

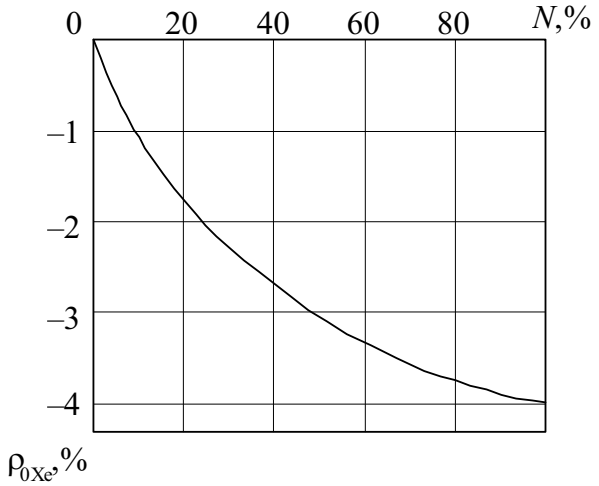


Рис. 3.1. Зависимость стационарного отравления Xe от мощности реактора [2]

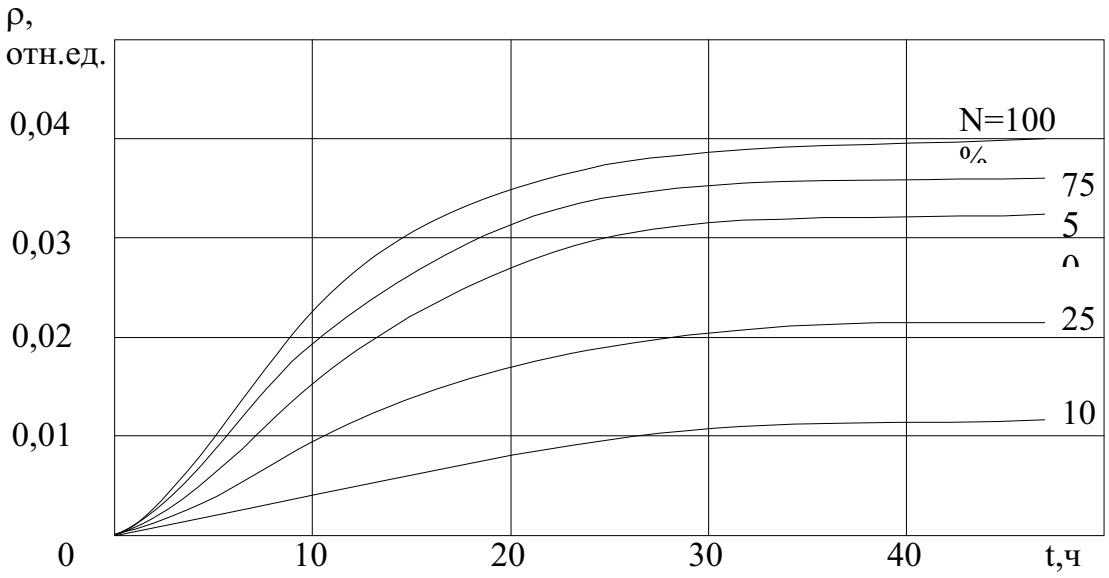


Рис. 3.2. Стационарное отравление реактора ВВЭР-440 ксеноном [6]

Эффект стационарного отравления ^{135}Xe можно определить по формуле

$$q_{0Xe} = \frac{0{,}052P}{(P + 370C_5)} \cdot \frac{\Sigma_{a_5}}{\Sigma_{a_U}}, \qquad (3.17)$$

где C_5 – концентрация ^{235}U в уране; P – удельная мощность в МВт на тонну урана

$$P = \frac{N(MBm)}{M(m)};$$

где M – масса урана, т.

Нестационарное отравление ксеноном

Изменение мощности реактора приводит к нарушению динамического равновесия между ростом и убылью Xe.

Дифференциальные уравнения, описывающие отравление реактора ксеноном после остановки, могут быть получены из (3.10), если считать, что в остановленном реакторе Φ=0:

$$\frac{dN_I}{dt} = -\lambda_I N_I t\,, \tag{3.18}$$

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = \lambda_I N_I - \lambda_{Xe} N_{Xe}\,.$$

Тогда

$$N_I(t) = N_{0I}\exp(-\lambda_I t); \tag{3.19}$$

$$N_{Xe}(t) = N_{0\,Xe}\exp(-\lambda_{Xe}t) + \frac{N_{0I}}{1-\lambda_{Xe}/\lambda_I}\cdot\left[\exp(-\lambda_{Xe}t) - \exp(-\lambda_I t)\right],$$

где t – время после остановки реактора, ч.

После остановки или снижения мощности происходит временное увеличение концентрации Xe вследствие распада I и уменьшение выгорания Xe. Соответствующее уменьшение $\rho_{зап}$ называется «йодной ямой».

Изменение реактивности после остановки реактора

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{0Xe}\left[\frac{\lambda^*_{Xe}}{\lambda_{Xe}-\lambda_I}\left(e^{-\lambda_I t} - e^{-\lambda_{Xe}t}\right) + e^{-\lambda_{Xe}t}\right], \tag{3.20}$$

$$\lambda^*_{Xe} = \lambda_{Xe} + \sigma_{Xe}\Phi\,.$$

Время достижения максимальной глубины «йодной ямы»

$$t^{макс}_{и.я} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}}\ln\left(\frac{\lambda_I}{\lambda_{Xe}}\cdot\frac{\lambda_{Xe}+\Phi\sigma_{Xe}}{\lambda_I+\Phi\sigma_{Xe}}\right). \tag{3.21}$$

Используя численное значение констант, получим

$$t^{макс}_{н.я} = -36{,}4\ln\left(0{,}734 + \frac{0{,}59}{2{,}11+\Phi\sigma_{Xe}\cdot 10^5}\right), \tag{3.22}$$

$$N^{макс}_{Xe} = 8{,}3\cdot 10^2\,\Phi\Sigma_f\left(1+\frac{0{,}81}{2{,}11+\Phi\sigma_{Xe}\cdot 10^5}\right)^{3{,}76}. \tag{3.23}$$

В реакторах на тепловых нейтронах концентрация Xe достигает максимального значения через 8÷10 часов.

При оценке эффектов реактивности следует учитывать, что ядерная концентрация Xe в момент максимального отравления включает стационарную концентрацию.

На рис. 3.3. графически представлен процесс нестационарного отравления Xe при остановке реактора.

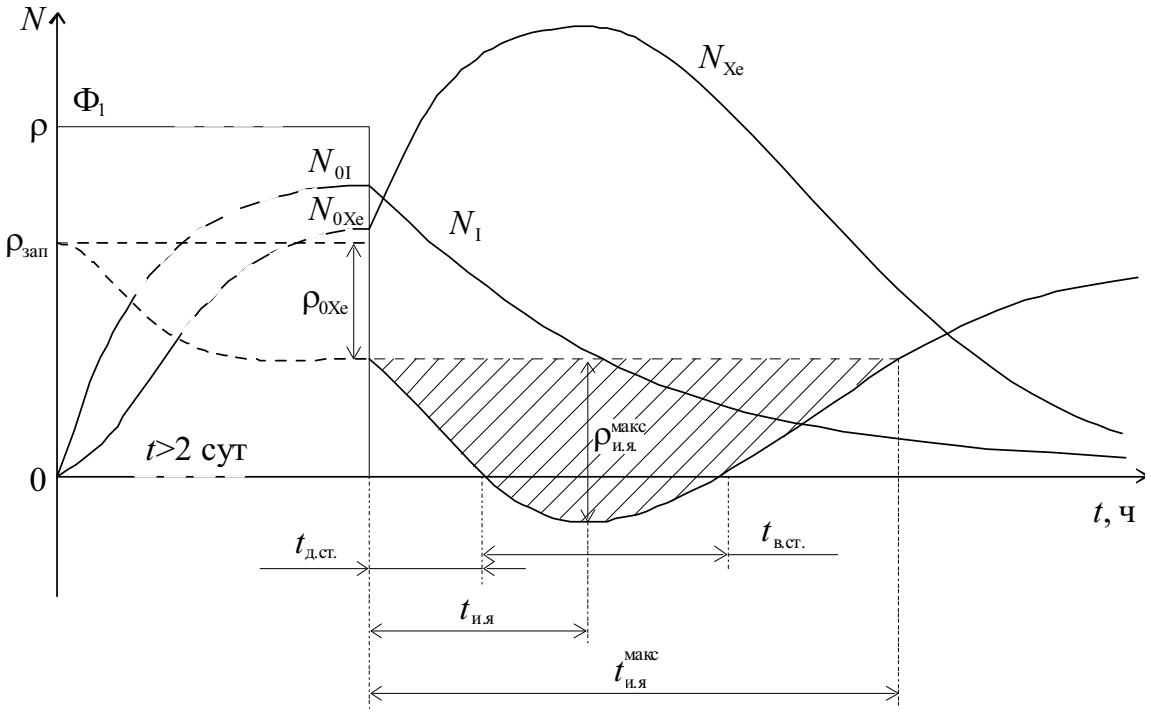


Рис. 3.3. Нестационарное отравление Xe после остановки реактора [10]

На рис. 3.4. показан примерный характер зависимости $\rho_{Xe}(t)$ для теплового реактора при остановке его на различных мощностях.

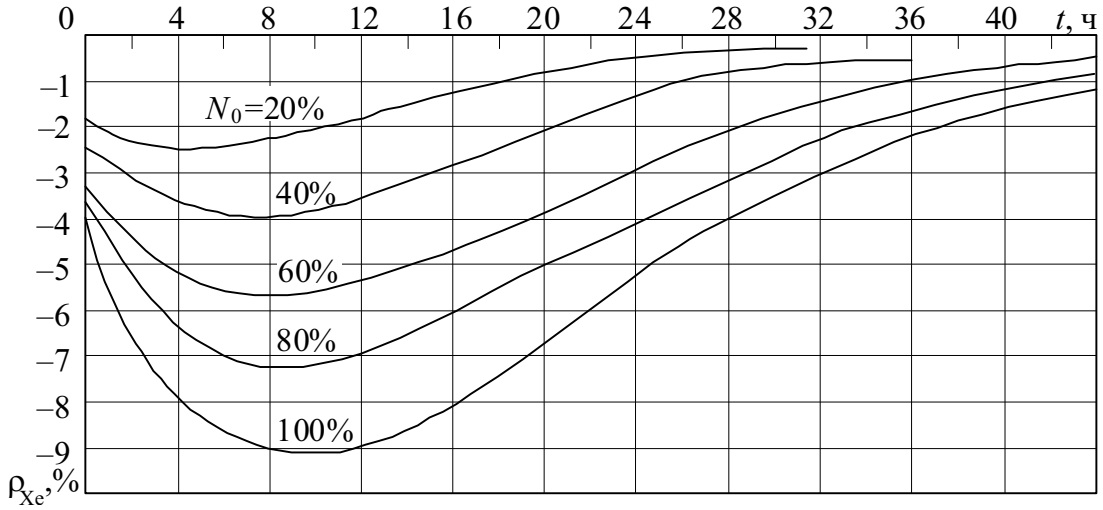


Рис. 3.4. Кривые «йодных ям» для реактора на тепловых нейтронах [10]

При расчете «йодной ямы» удобным является следующее соотношение:

$$\rho_{\text{и.я}}(t) = A\left(e^{-\lambda_{Xe}t} - 1\right) - B\left(e^{-\lambda_I t} - 1\right). \qquad (3.24)$$

Зависимости A, B, $e^{\pm\lambda_I t}$, $e^{\pm\lambda_{Xe}t}$ представлены на рис. 3.5.

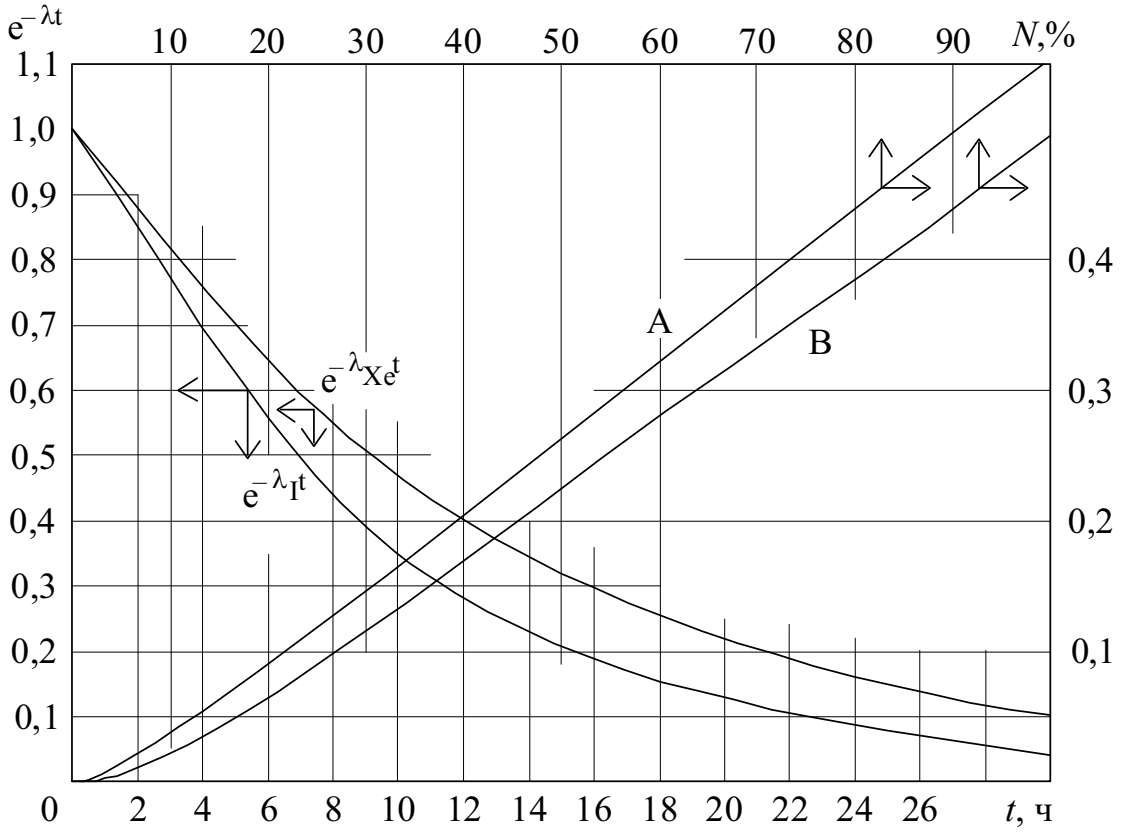


Рис. 3.5. К расчету отравления Xe [10]

Можно воспользоваться следующим соотношением:

$$q_{Xe}(t) = q_{0Xe}\left\{\left[1 + 2{,}6\left(1 + \frac{P}{370C_5}\right)\right]e^{-t/13{,}4} - 2{,}6\left(1 + \frac{P}{370C_5}\right)e^{-t/9{,}7}\right\}, \qquad (3.25)$$

где $q_{0\text{Xe}}$ – отравление в стационарном режиме; t – время после остановки реактора, ч.

Отравление при изменениях мощности и ксеноновая нестабильность

При изменении мощности реактора баланс ядер I и Xe нарушается, что вызывает переходные процессы с изменением реактивности реактора.

Так, при уменьшении мощности снижается реактивность реактора, т. к. в результате снижения плотности нейтронного потока уменьшается выжигание ксенона нейтронами, а его поступление из I, количество которого на момент снижения мощности определяется прежним уровнем мощности, не меняется, что приводит к росту концентрации ядер Xe.

На рис. 3.6 и 3.7 графически представлены процессы, обуславливающие нестационарное отравление при изменениях мощности [10].

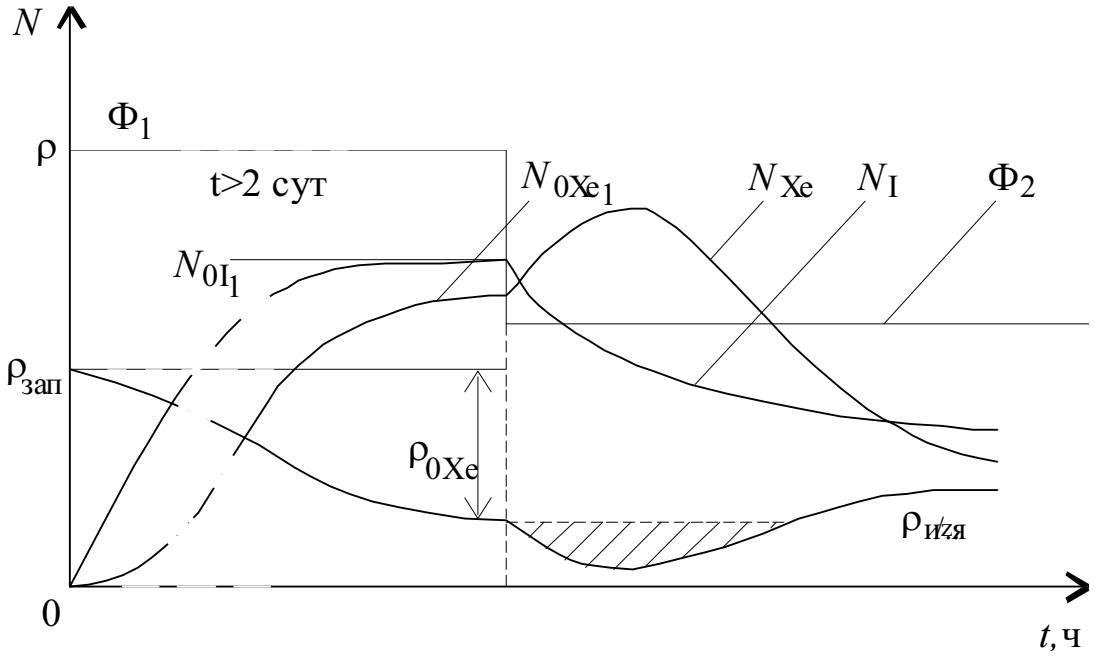


Рис. 3.6. Нестационарное отравление Xe при снижении мощности

В общем случае при изменении Φ от значения Φ_1 до Φ_2 изменение происходит по следующему закону [10]:

$$\rho_{Xe}(t)=\rho_{0Xe}\left[\frac{\lambda^*_{Xe1}}{\lambda^*_{Xe2}}\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\left(1-e^{-\lambda^*_{Xe2}t}\right)+\frac{\lambda^*_{Xe1}}{\lambda^*_{Xe2}-\lambda_I}\left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}-1\right)\cdot\left(e^{-\lambda^*_{Xe2}t}-e^{-\lambda_I t}\right)+e^{-\lambda^*_{Xe2}t}\right]. \qquad (3.26)$$

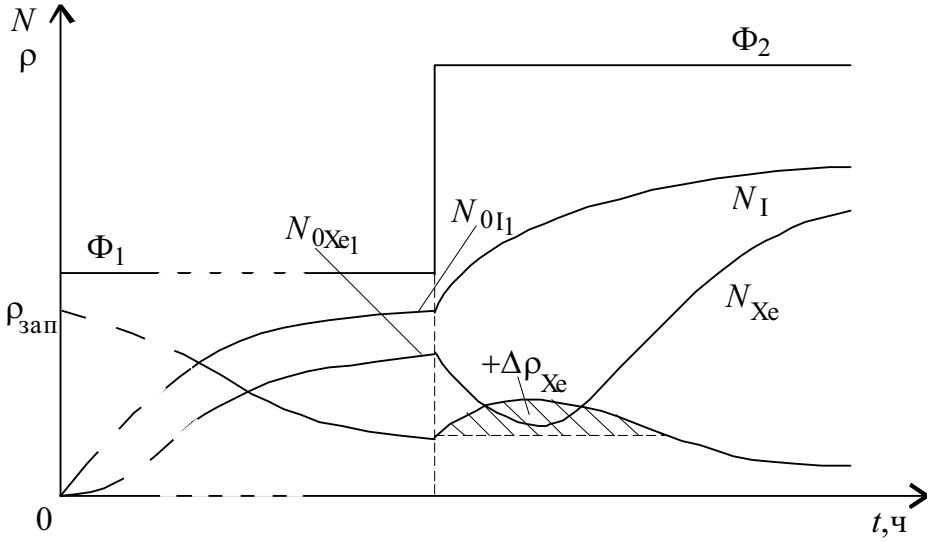


Рис. 3.7. Нестационарное отравление Xe при увеличении мощности

Графики нестационарного отравления *Xe* представлены на рис. 3.8–3.10 [10, 39].

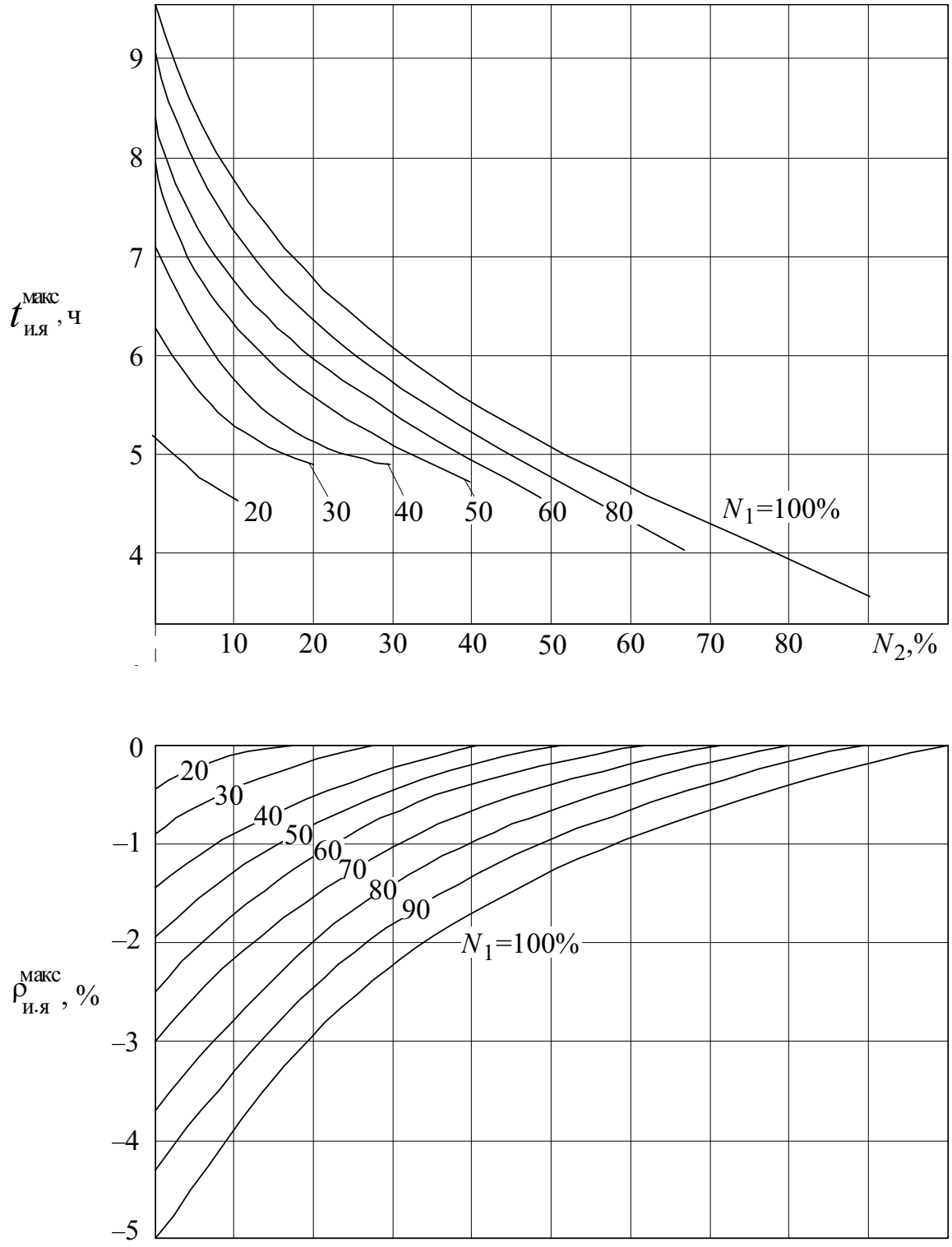
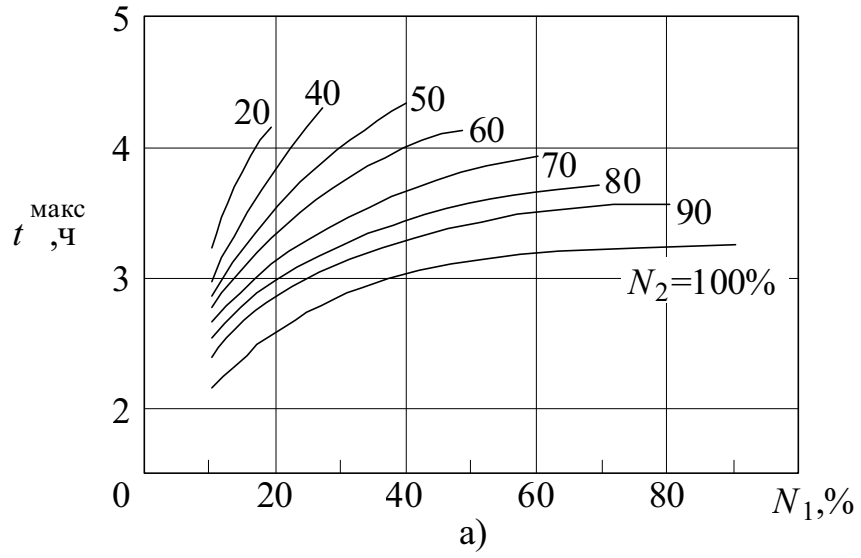
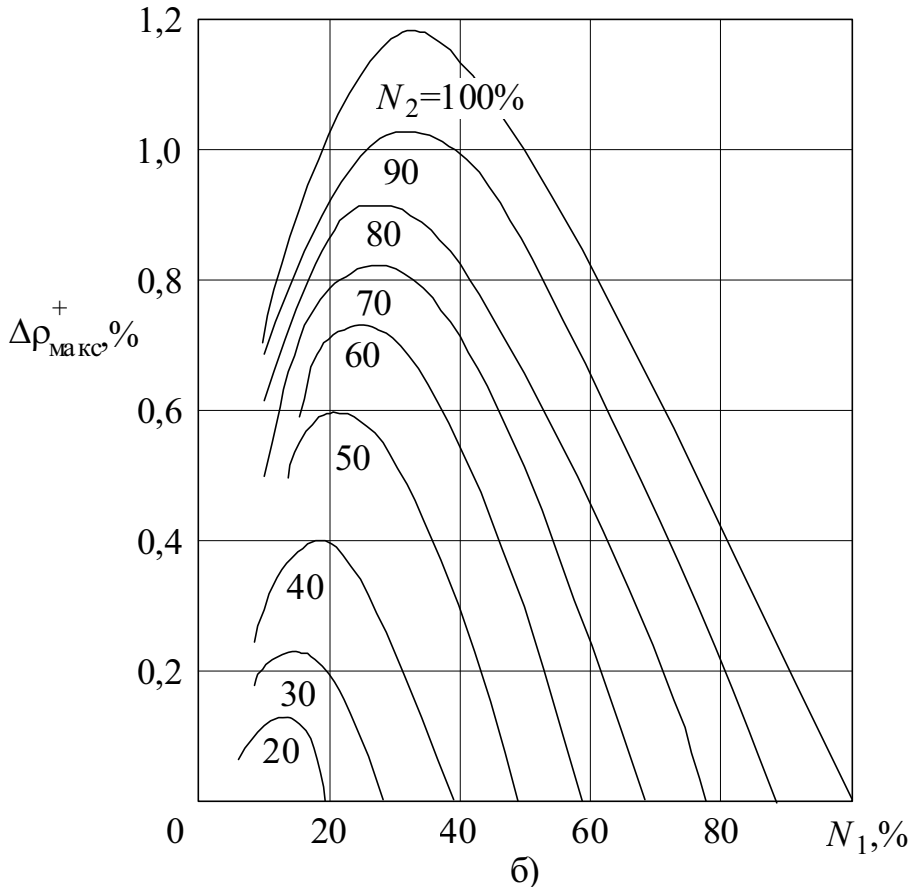


Рис. 3.8. Параметры «йодных ям» после снижения мощности реактора



а)



б)

Рис. 3.9. Параметры отравления Xe после увеличения мощности реактора

Эти зависимости необходимы оператору для:

1) оценки возможности маневрирования мощностью реактора при небольшом запасе $\rho_{зап}$;
2) расчета критического положения органов регулирования при пуске реактора после остановки;

3) выбора режима работы и программы снижения мощности, чтобы избежать вынужденной стоянки при кратковременной остановке;
4) определения допустимой и вынужденной стоянки при попадании в «йодную яму»;
5) оценки частичного или полного использования $\Delta\rho_{зап}$ на «йодную яму» для получения дополнительного энергозапаса в конце кампании.

Рассмотренные переходные процессы вызывают в энергетических реакторах ксеноновую нестабильность. Вероятность возникновения ксеноновых колебаний возрастает с увеличением размеров реактора. Наибольшие возмущения нейтронного поля в ВВЭР-1000 возникают в режиме работы с изменением уровня мощности со 100 до 50 % на некоторое время с последующим подъемом до 100 % [39].

Случайное увеличение потока нейтронов в ограниченном объеме, вызванное изменением мощности, перемещением стержней или другими причинами приводит сначала к снижению концентрации ксенона, росту реактивности и дальнейшему повышению мощности. Постепенно концентрация ксенона становится выше первоначальной, реактивность и мощность начинают снижаться, концентрация ксенона расти и процесс превращается в циклический с периодом ксеноновых колебаний 6÷10 часов.

Ксеноновые колебания мощности распространяются по всему объему реактора и могут привести к перегреву твэлов.

Для предотвращения колебаний реактор должен управляться стержнями по специальной программе или иметь достаточно большие отрицательные температурные коэффициенты реактивности.

Так, для реактора ВВЭР-1000 радиальные и азимутальные деформации распределения мощности могут быть скомпенсированы извлечением или погружением определенных групп поглотителей. Высотные деформации можно компенсировать с помощью специально предусмотренной для этой цели группы управляющих стержней УСП с половинной высотой поглотителя, перемещая их по высоте активной зоны [39].

Накопление самария-149 после пуска реактора и стационарное отравление самарием

Стационарное отравление Sm-149 вычисляется по аналогии с ксеноном.

В соответствии с (3.9) дифференциальные уравнения, описывающие баланс ядер прометия и самария в 1 см^3 активной зоны, имеют вид

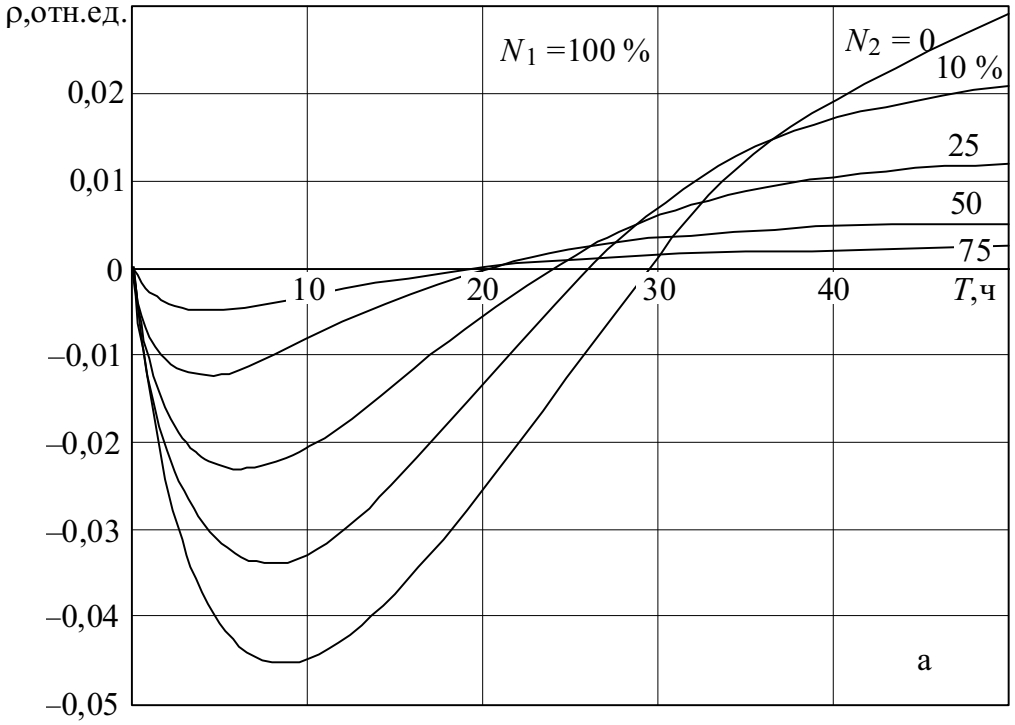
$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = w_{Pm}\Phi\Sigma_{fu} - \lambda_{Pm}N_{Pm}, \qquad (3.27)$$

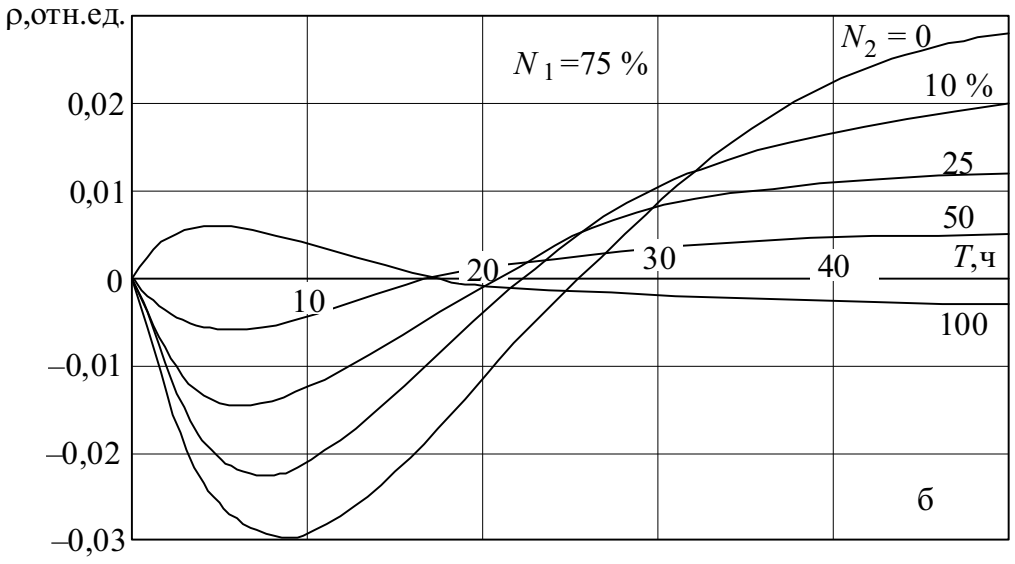
$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \lambda_{Pm}N_{Pm} - \sigma_{Sm}N_{Sm}\Phi.$$

Теоретически стационарные концентрации прометия и самария достигаются в пределе при $t \to \infty$. Практически временем установления стационарной концентрации можно считать время, когда концентрация Pm будет отличаться от равновесной на 5÷10 %. Это соответствует примерно 8÷10 суткам. Следовательно, равновесные концентрации Pm и Sm определяются соотношениями:

$$N_{0Pm} = w_{Pm}\Sigma_{fu}\Phi/\lambda_{Pm}, \qquad (3.28)$$

$$N_{0Sm} = w_{Pm}\Sigma_{fu}/\sigma_{Sm}.$$





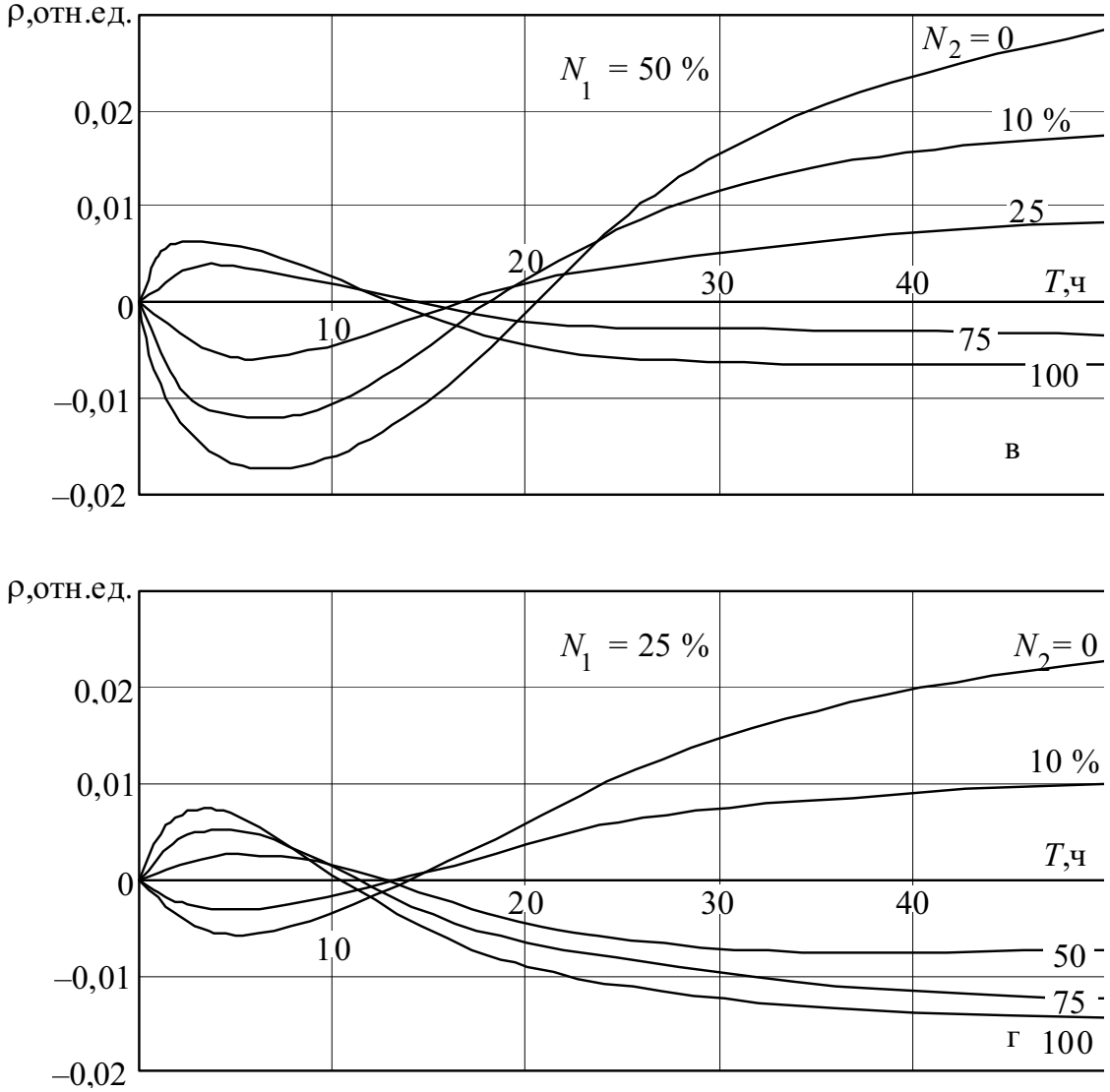


Рис. 3.10. Нестационарное отравление ВВЭР-440 при сбросе мощности со 100, 75, 50 и 25%-го уровня

Равновесная концентрация Pm пропорциональна плотности потока нейтронов. Равновесная концентрация самария не зависит от нее, но время достижения N_{0Sm} прямопропорционально плотности нейтронного потока.

Накопление Pm и Sm при работе реактора на стационарной мощности происходит по экспоненциальному закону:

$$N_{Pm}(t) = N_{0Pm}\left(1 - e^{-\lambda_{Pm}t}\right), \tag{3.29}$$

$$N_{Sm}(t) = N_{0Sm}\left[1 - \exp\left(-\Phi\sigma_{Sm}t\right)\right] - \frac{N_{0Pm}}{\Phi\sigma_{Sm}/\lambda_{Pm} - 1}\cdot\left[\exp\left(-\lambda_{Pm}t\right) - \exp\left(-\Phi\sigma_{Sm}t\right)\right].$$

Отравление Sm быстро растет при увеличении *С*5 до 10 %, а потом изменяется очень мало (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Зависимость отравления Sm от увеличения C_5, 10 %

C_5, %	0,7	1	2	5	7	10	20	100
$q_{0\mathrm{Sm}}$, %	0,60	0,67	0,78	0,87	0,89	0,90	0,92	0,96

Потеря реактивности при отравлении Sm в любой момент времени до установления стационарного значения определяется из соотношения:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{0Sm}\left[1 - \lambda_{Pm} e^{-\sigma_{Sm}\Phi t} / \left(\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm}\Phi\right) + \sigma_{Sm}\Phi e^{-\lambda_{Pm}t} / \left(\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm}\Phi\right)\right], \quad (3.30)$$

где t – время, сут.

На рис. 3.11 представлена зависимость изменения концентрации Pm и Sm, а также потеря $\rho_{\text{зап}}$ вследствие отравления Sm при работе реактора на стационарной мощности и после остановки.

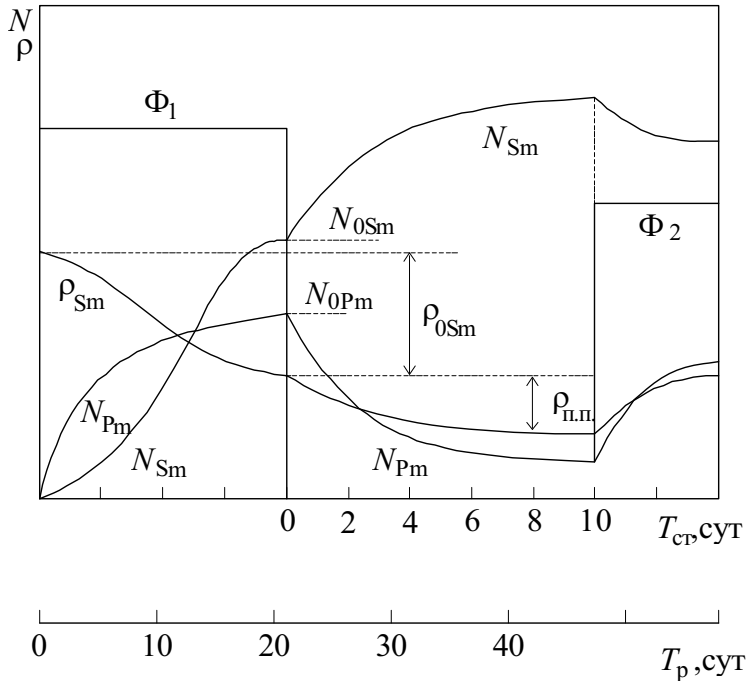


Рис. 3.11. Динамика отравления Sm [10]

На рис. 3.12 дана зависимость прометиевого провала от мощности, на которой до остановки работал реактор [10].

При остановке с любой мощности N_i, на которой работал реактор не менее 8 суток, глубина прометиевого провала определяется соотношением

$$\rho_{\text{п.п.}}^{N_i} = \rho_{\text{п.п.}}^{\text{ном}} N_i / N_{\text{ном}}. \quad (3.31)$$

Для реактора на тепловых нейтронах $\rho_{\text{п.п.}}^{\text{ном}} = -0{,}5$ %

$$\rho_{\text{п.п.}}^{N_i} = -0{,}5 N_i / N_{\text{ном}}, \text{ %}. \quad (3.32)$$

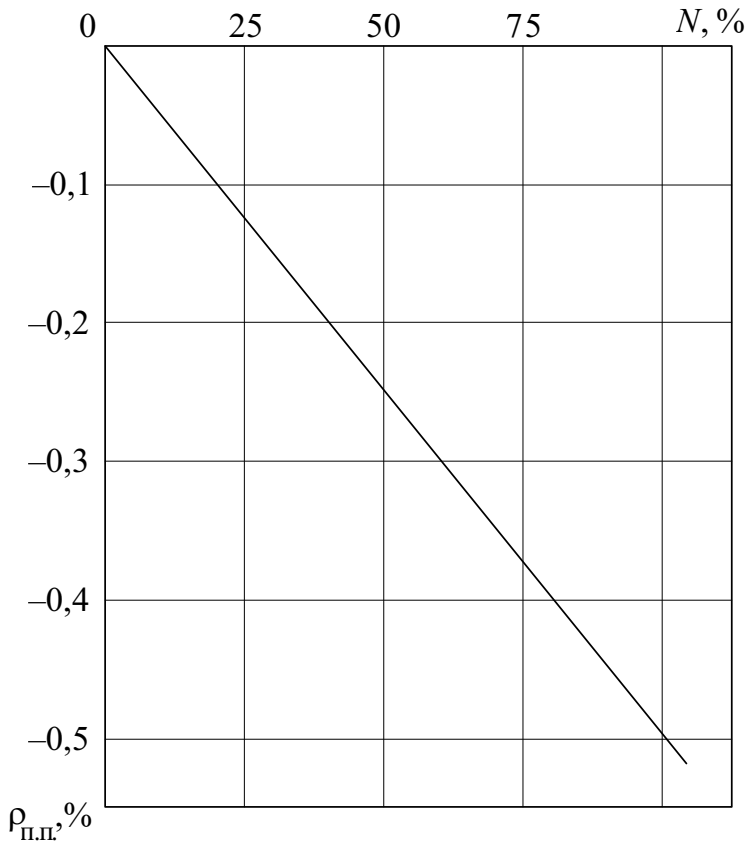


Рис. 3.12. Зависимость максимальной глубины $\rho_{п.п.}$ от мощности реактора ТР до остановки

На рис. 3.13 представлены кривые прометиевых провалов для реактора на тепловых нейтронах [10].

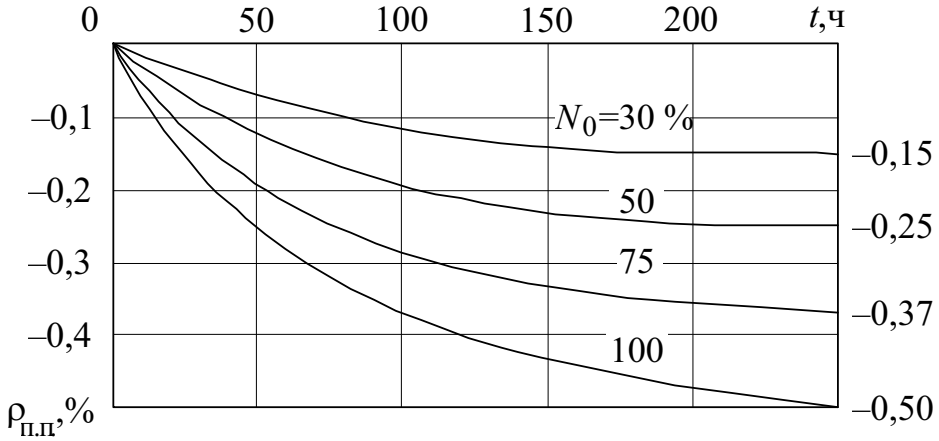


Рис. 3.13. Кривые прометиевых провалов реактора ТР

Время установления стационарного отравления Sm-149 можно оценить из соотношения

$$t_{ecn} \approx 10^{15} / \Phi \text{; сут.} \qquad (3.33)$$

На рис. 3.14 приведены кривые отравления Sm для ВВЭР-440.

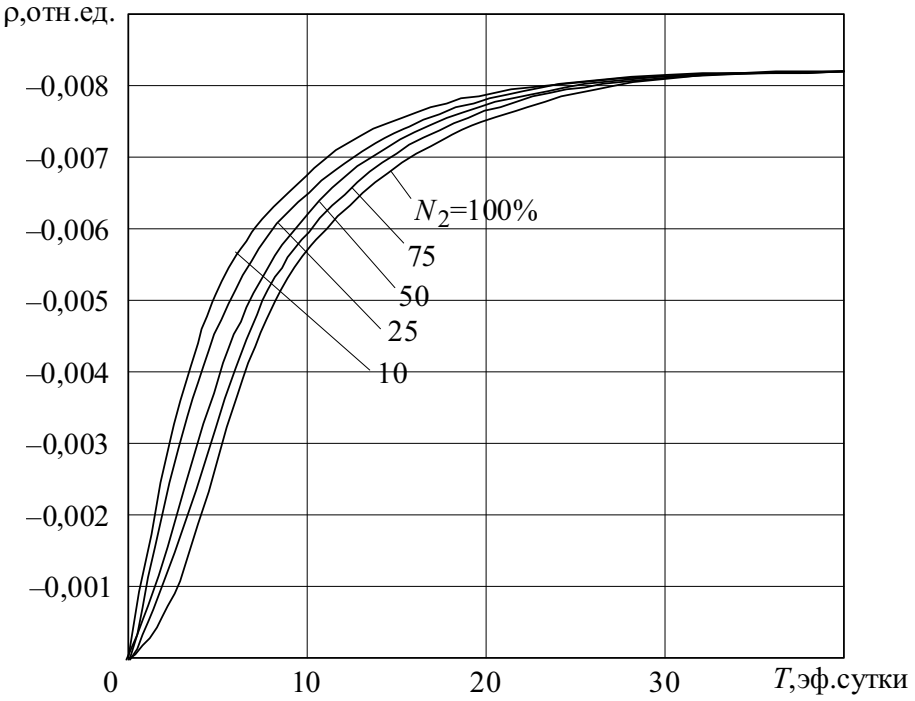


Рис. 3.14. Стационарное отравление ВВЭР-440 самарием

Кинетика отравления самарием после выключения реактора

Наибольший интерес представляет влияние самария на процесс изменения реактивности после выключения реактора.

В этом случае уравнения (3.27) при $\Phi = 0$ имеют вид

$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = -\lambda_{Pm} N_{Pm}\,, \tag{3.34}$$

$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \lambda_{Pm} N_{Pm}\,.$$

Тогда

$$N_{Pm}(t) = N_{0Pm} \exp\left(-\lambda_{Pm} t\right), \tag{3.35}$$

$$N_{Sm}(t) = N_{0Sm} + N_{0Pm}\left[1 - \exp\left(-\lambda_{Pm} t\right)\right].$$

После остановки реактора убыль Sm прекращается, а прибыль его из Pm продолжается до полного распада последнего. Практически через 8÷10 суток распадается ~90 % Pm.

Уменьшение $\rho_{\text{зап}}$ при накоплении Sm после остановки носит название «прометиевый провал».

Изменение реактивности после остановки реактора

$$\rho_{n.n.}(t) = \rho_{n.n.}\left[1 - \exp\left(-\lambda_{Pm} t\right)\right], \tag{3.36}$$

где $\rho_{n.n.} = \rho_{0Sm} \dfrac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} \Phi$.

В отличие от кинетики отравления ксеноном отравление самарием после выключения реактора непрерывно возрастает, стремясь к предельному значению.

Непрерывный рост отравления в период остановки реактора объясняется тем, что самарий стабилен, а образование его происходит за счет распада накопившегося прометия.

Максимальный самариевый выбег может достигать 0,25 % за время порядка 5 ч после подъема мощности реактора с нуля до 10 %, при этом предполагается, что реактор стоял 15 суток и концентрация самария установилась постоянной.

При Φ<10^{14} нейтрон/(см^2·с) $|\rho_{n.n.}| < |\rho_{0Xe}|$, поэтому нестационарное отравление Sm после остановки не может повлиять на возможность очередного пуска реактора, так как реактивность, высвободившаяся вследствие распада Xe, больше глубины прометиевого провала. В реакторе с большим потоком может оказаться, что $|\rho_{n.n.}| > |\rho_{0Xe}|$ и тогда пуск реактора после остановки невозможен (рис. 3.15) [10].

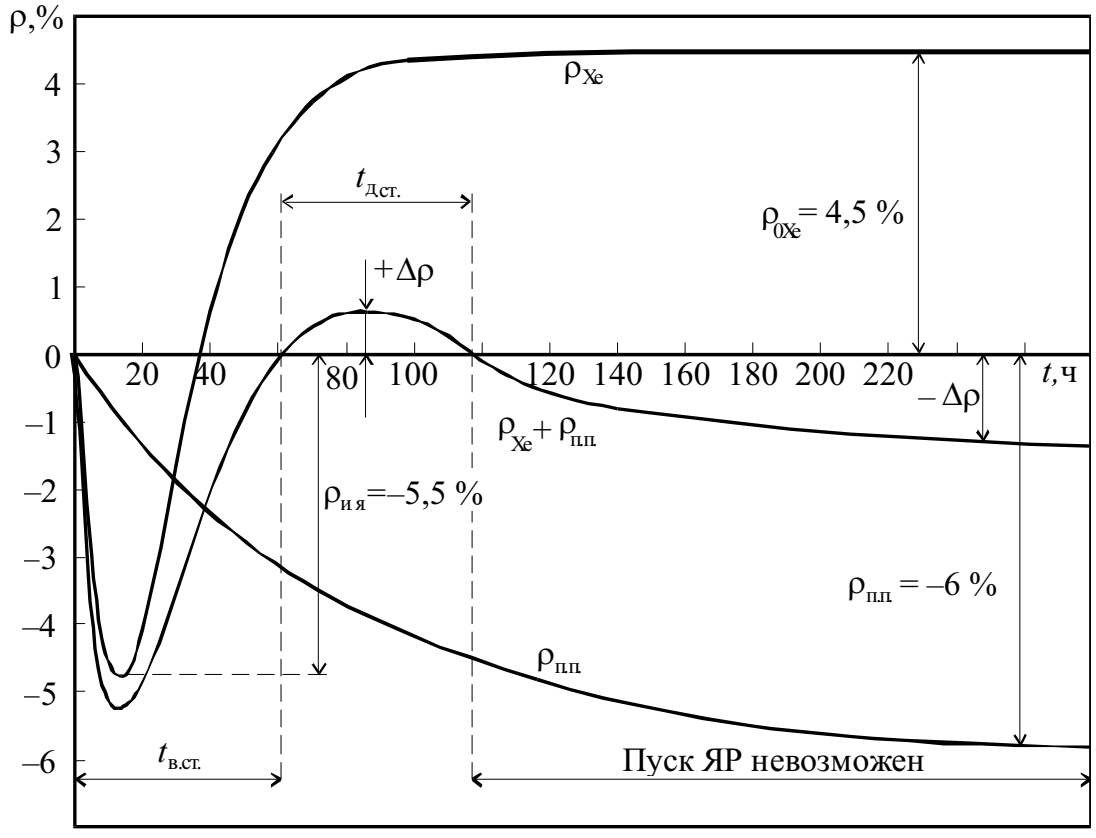
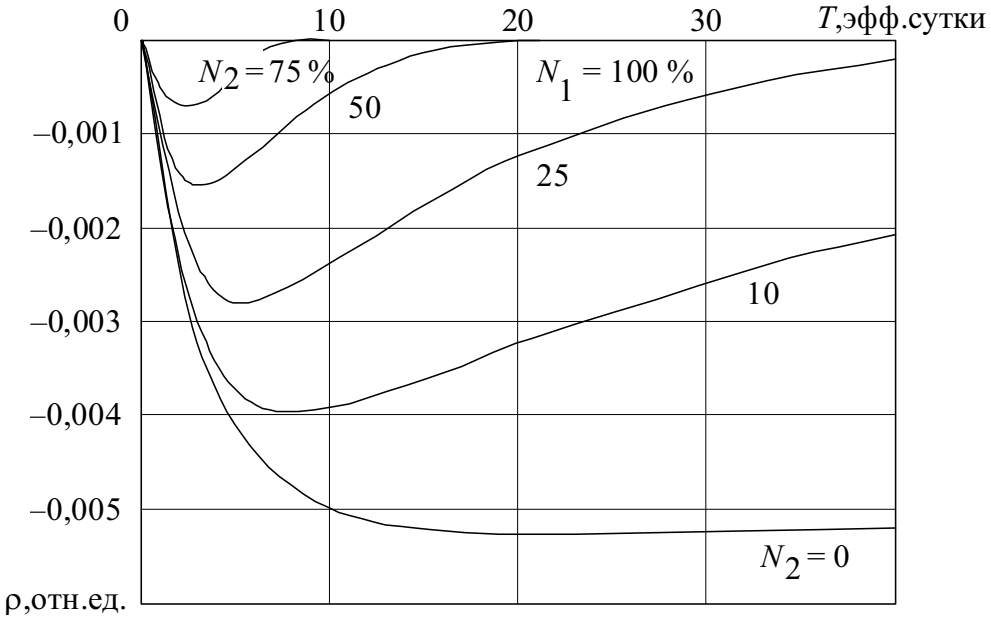
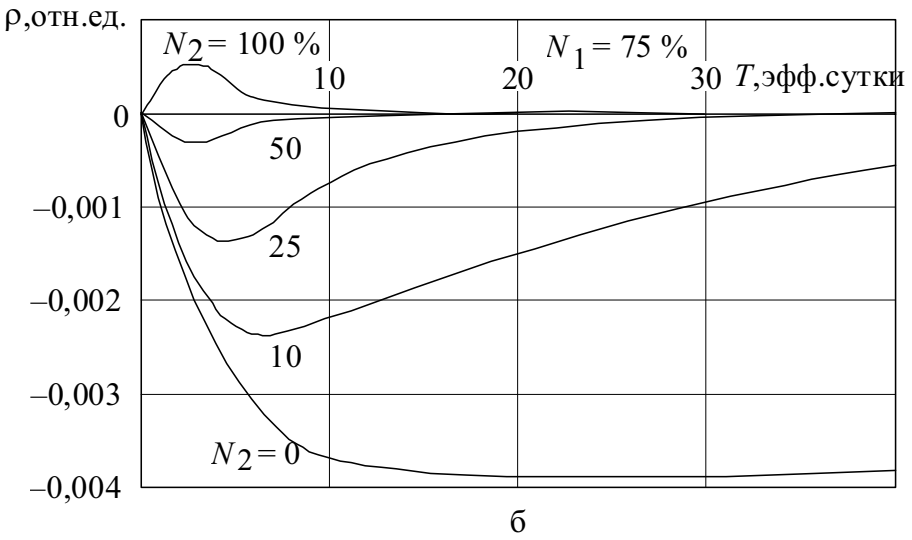


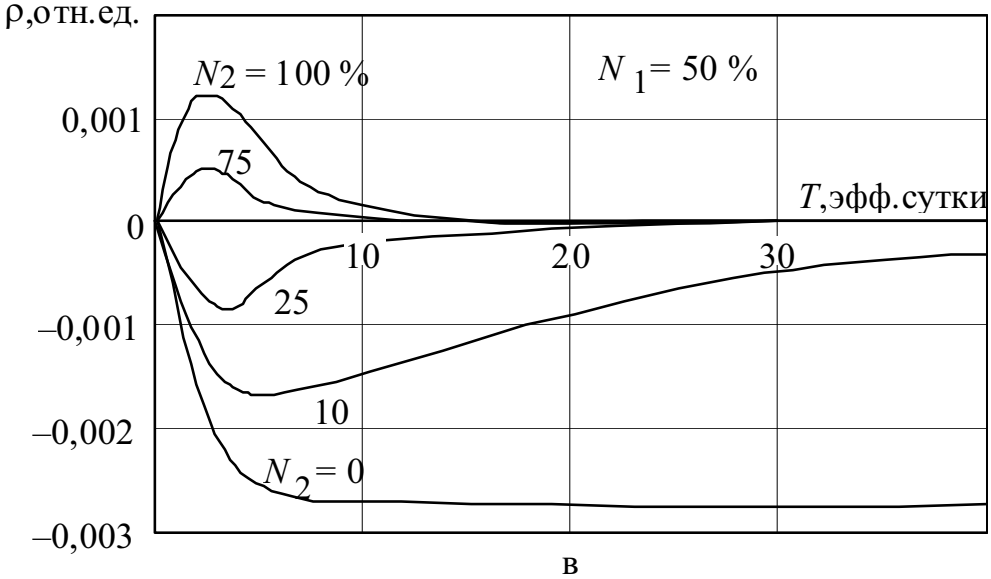
Рис. 3.15. Совместное воздействие Xe и Sm на реактивность реактора при Ф>4·1014 нейтрон/(см2·с) [10]


0
10
20
30
T,эфф.сутки
N2 = 75 %
50
N1 = 100 %
25
10
–0,001
–0,002
–0,003
–0,004
–0,005
N2 = 0
ρ,отн.ед.

а


ρ,отн.ед.
N2 = 100 %
N1 = 75 %
10
20
30
T,эфф.сутки
0
50
–0,001
25
–0,002
10
–0,003
N2 = 0
–0,004

б


ρ,отн.ед.
N2 = 100 %
N 1 = 50 %
0,001
75
T,эфф.сутки
0
10
20
30
25
–0,001
10
–0,002
N2 = 0
–0,003

в

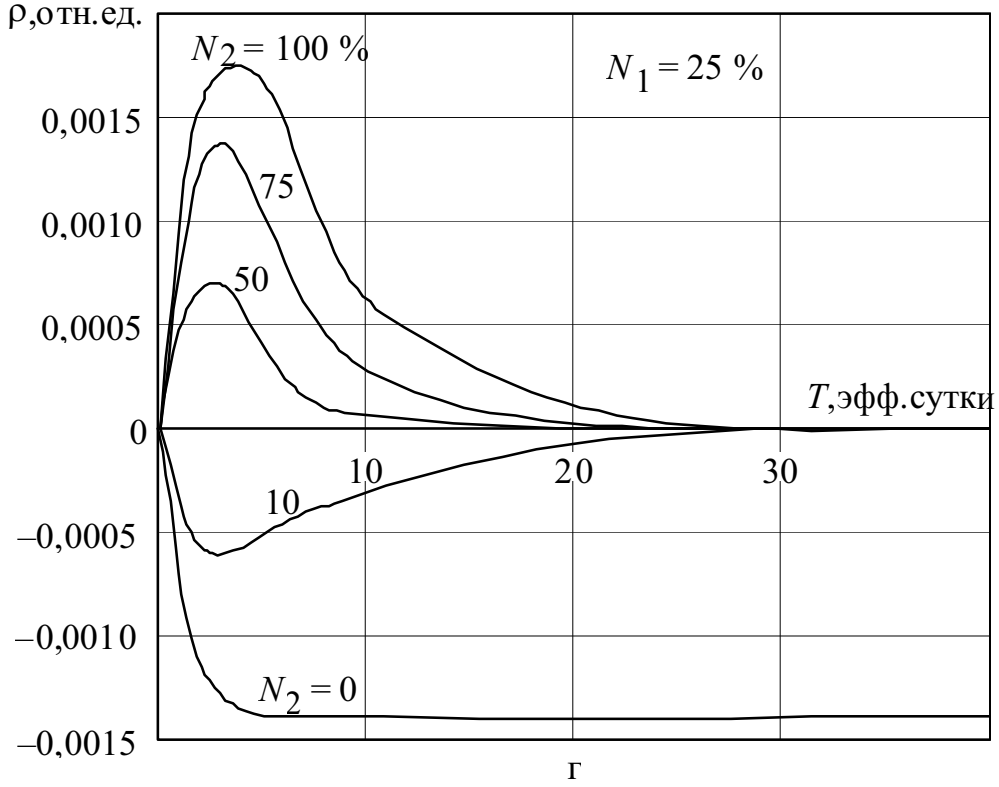


Рис. 3.16. Нестационарное отравление ВВЭР-440 самарием при изменении тепловой мощности со 100, 75, 50, 25%-го уровня [39]

Изменение мощности реактора с N_1 до N_2 (рис. 3.16) вызывает медленно протекающие переходные процессы, связанные с изменением числа ядер Pm-149 и Sm-149 в активной зоне. Скорость убыли непосредственно связана с потоком нейтронов (мощностью), а прибыли – с периодом полураспада Nd и Pm.

3.2. Расчеты нуклидного состава и характеристик, связанных с выгоранием топлива, образованием продуктов деления и актинидов

В процессе работы в реакторе непрерывно протекают процессы, приводящие к изменению нуклидного состава реакторных материалов.

В результате деления ядер топлива происходит непрерывная убыль делящегося материала. Этот процесс называется выгоранием и сопровождается потерей общего запаса реактивности.

Наряду с выгоранием ядер урана–235 за счет захвата нейтронов ядрами урана–238 образуется смесь изотопов ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu, причем ^{239}Pu и ^{241}Pu делятся под действием тепловых нейтронов.

В реакторе, содержащем ^{232}Th, образуется делящийся под действием тепловых нейтронов ^{233}U. Процесс образования новых делящихся изотопов называется воспроизводством ядерного топлива, который сопровождается увеличением общего запаса реактивности.

Деление ядер топлива сопровождается появлением в активной зоне осколков, а также продуктов их радиоактивного распада, который в различной степени поглощают нейтроны, уменьшая реактивность. Поглощение нейтронов стабильными или долгоживущими изотопами называется шлакованием.

Всего в цепочках распада обнаружено более 200 нуклидов.

Продукты активации возникают при взаимодействии нейтронов с конструкционными материалами, с примесями теплоносителя, замедлителя и самого топлива.

В основном все продукты деления образуются внутри таблеток ядерного топлива и остаются там.

Некоторые из продуктов деления, таких как тритий и особенно криптон и ксенон, выделяются в газообразном виде, сильно летучими являются йод и цезий. То же самое можно сказать и о продуктах активации.

Радиоактивные выбросы АЭС в нормальном режиме работы

Работа АЭС, как и большинства других промышленных предприятий, сопровождается образованием отходов, особенностью которых является то, что они радиоактивны. На АЭС предпринимаются значительные усилия, чтобы сократить даже малую долю радиоактивных отходов, выходящих за ее пределы, но полностью исключить их поступление в окружающую среду нельзя. Они поступают в атмосферу с технологическими и вентиляционными газами. Радионуклиды, которые могут оказывать воздействие на биосферу при работе АЭС, называют биологически значимыми радионуклидами.

Поэтому рассмотрим отдельно эти продукты деления и активации.

Среди большого перечня искусственных радионуклидов, образующихся при работе ядерного реактора, важнейшее значение имеет группа биологически активных радионуклидов. Разнородные по своим дозиметрическим характеристикам эти радионуклиды, в число которых входят ^{131}I, ^{90}Cr, ^{137}Cs, ^{3}H, ^{14}C, ^{32}P и др., имеют одну общую особенность – все они являются «двойниками» или близкими аналогами химических элементов, выполняющих важные биологические функции в живых организмах. Так, литий и углерод-14 могут входить в состав любых биомолекул, в том числе генетических структур; стронций-90 является близким аналогом кальция и входит в состав костных тканей; радиоцезий – химический аналог калия и включается в мышечные ткани; йод необходим для функционирования щитовидной железы; фосфор (^{32}P) играет важную роль в энергетике клеток; железо, кобальт, цинк и их радионуклиды входят в состав ферментов (катализаторов биохимических реакций), например, железо входит в состав гемоглобина, кобальт – в состав витамина B_{12} и т. д.

В природных условиях целый ряд элементов, необходимых живым организмам, присутствует в очень малых количествах, в связи с этим организмы обладают способностью активно захватывать, накапливать в клетках объем элементов, значительно больший, чем в окружающей среде. Коэффициенты накопления растениями и животными биогенных элементов относительно их содержания в окружающей среде могут быть очень большими и достигать величин порядка $n \cdot 10^5$. Радионуклиды – аналоги биологических элементов – активно ассимилируются в организмах растений, животных и человека, включаются в биологические структуры, концентрируются в отдельных органах и тканях.

Радионуклиды, инкорпорированные в организме, создают внутреннее клиническое облучение, практически полностью поглощаемое тканями. По сочетанию дозиметрических и биологических свойств радионуклиды делят на 4 класса опасности:

группа *А* – радионуклиды с особо высокой токсичностью;

группа *Б* – радионуклиды с высокой токсичностью;

группа *В* – радионуклиды со средней токсичностью;

группа *Г* – радионуклиды с малой радиотоксичностью.

Для населения и работников АЭС необходимо знать пути поступления биологически активных радионуклидов в организм и особенности их накопления и выведения.

Характеристики некоторых естественных и искусственных радионуклидов:

Тритий (^{3}H, $T_{1/2}$ = 12,35 лет).

Обычно входит в состав тритированной воды – НТО. В организм человека может поступать с вдыхаемым воздухом и через желудочно–кишечный тракт (ЖКТ). Распределяется равномерно по органам и тканям. Период полувыведения после однократного воздействия – примерно 10 суток. Мягкий β-излучатель. Группа радиационной опасности – Г.

Радон (^{222}Rn, $T_{1/2}$ = 3,82 сут).

Естественный радионуклид вносит основной вклад в природную радиоактивность воздуха, в организм человека поступает из воздуха и воды. Инертный газ хорошо растворяется в крови, воде и других жидкостях организма. Мягкий α-излучатель. Период биологического полувыведения – около 1 часа. Группа опасности – Г.

Калий-40 ($T_{1/2}$ = 1,3 млрд лет).

Природный радионуклид, в основном, присутствует в воде, почве. Содержится во всех живых организмах, своим излучением создает естественное внутреннее радиационное облучение.

Углерод-14 ($T_{1/2}$ = 5730 лет).

Естественный радионуклид является также одним из компонентов в выбросах предприятий по регенерации ядерного топлива. В процессе

фотосинтеза накапливается в растениях, животные и человек получают ^{14}C преимущественно по пищевым цепочкам, вклад ингаляционного пути – менее 1 %. Входит в состав биомолекул, в том числе в генетические структуры (ДНК и РНК). Мутагенное действие ^{14}C определяется радиационным воздействием β-частиц, а также изменением химического состава ДНК или РНК за счет превращения атома ^{14}C в атом азота ^{14}N. Группа радиотоксичности – Г.

Радионуклиды цезия (^{134}Cs, $T_{1/2}$ = 2,062 года; ^{137}Cs, $T_{1/2}$ = 30 лет).

Радионуклиды цезия при любом пути поступления в организм хорошо усваиваются. Преимущественное поступление происходит с пищей, всасывание в ЖКТ достигает 100 %, далее радионуклид равномерно распределяется по органам и тканям. При хроническом поступлении кратность накопления зависит от вида организмов, достигая 10÷30. Период биологического полувыведения – 70 суток. Группы радиационной опасности: ^{134}Cs – Г, ^{137}Cs – В.

Стронций–90 ($T_{1/2}$ = 29,12 лет).

Поступает в организм через ЖКТ, легкие и кожу. Уровни усвоения в ЖКТ зависят от физико-химической формы нуклида и колеблются от 5 до 100 %. Хорошо всасывается в легкие. Избирательно накапливается в скелете. В мягких тканях задерживается менее 1 % стронция. Период полувыведения – 30–50 суток. Чистый β-излучатель. Группа радиационной опасности – Б.

Йод–131 ($T_{1/2}$ = 8 сут).

Характеризуется высокой миграционной способностью. Хорошо растворяется в воде, быстро включается в пищевые цепи. Всасывание из ЖКТ и легких составляет 100 %. Преимущественно накапливается в щитовидной железе. β-, γ-излучатель. Группа радиационной опасности – Б.

Радионуклиды церия (^{141}Ce, $T_{1/2}$ = 32,5 сут; ^{144}Ce, $T_{1/2}$ = 284,3 сут).

Могут поступать в организм преимущественно ингаляционным путем, частично – через ЖКТ. В организме депонируются в скелете и печени. Группы радиационной опасности: ^{141}Ce – В; ^{144}Ce – Б.

Радионуклиды рутения (^{103}Ru, $T_{1/2}$ = 39,28 сут; ^{106}Ru, $T_{1/2}$ = 368,2 сут).

Поступает в организм в основном ингаляционным путем, задерживается в легких. В ЖКТ усваивается небольшая часть нуклида из пищи, далее он значительно равномерно распределяется по органам и тканям. Выводится из организма медленно. β-, γ-излучатели. Группы радиационной опасности: ^{103}Ru – В, ^{106}Ru – Б.

Плутоний–239 ($T_{1/2}$ = 24065 лет).

Микрочастицы плутония задерживаются в легких при дыхании. Растворимые соединения плутония не всасываются в ЖКТ, однако вне

пищи плутоний может частично усваиваться. Из организма выводится плохо. Жесткий α-излучатель. Группа опасности – А.

Все продукты деления образуются внутри таблеток ядерного топлива и в основном остаются там. Выход через герметичную оболочку возможен за счет процесса диффузии. Этот выход мал для всех нуклидов, кроме трития. Последний химически связывается цирконием (оболочка) и в результате выход трития через оболочку не превышает 1 %. Из-за дефектов оболочки (допускается число твэлов с микротрещинами не свыше 1 %, с крупными дефектами – 0,1 %) в воду попадают как газообразные, так и некоторое количество нелетучих продуктов деления или даже топлива.

Основную часть в выбросах радионуклидов в атмосферу составляют инертные радиоактивные газы (ИРГ) (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Биологически значимые радионуклиды благородных газов и йода

Нуклид	$T_{1/2}$	Нуклид	$T_{1/2}$	Нуклид	$T_{1/2}$
^{85}Kr	10,7 года	^{133}Xe	5,2 сут	^{129}I	$1{,}6\cdot10^{7}$лет
^{85m}Kr	4,5 часа	^{133m}Xe	2,2 сут	^{131}I	8 сут
^{87}Kr	1,3 часа	^{135}Xe	9,1 часа	^{133}I	21час
^{88}Kr	2,8 часа	^{135m}Xe	15,7 мин	^{135}I	6,6 часа

Для уменьшения активности выбрасываемых газов на АЭС осуществляется их временная задержка перед выбросом в трубу, в течение которой происходит распад короткоживущих радионуклидов. Для этого газы либо на определенное время закачивают в специальные газгольдеры, либо пропускают через радиохроматографическую систему (РХС) очистки газов. Временная задержка газообразных отходов во много раз уменьшает их активность, что эквивалентно улавливанию значительной части радионуклидов. В вопросах обеспечения радиационной безопасности АЭС тритий занимает особое место. Различают тритий естественного и искусственного происхождения. Естественный тритий образуется в верхних слоях атмосферы при взаимодействии космического излучения с ^{14}N и ^{16}O. Естественный тритий содержится в атмосфере в количестве 1 атом Т на 10^{14} атомов водорода, что соответствует удельной активности $3{,}2\cdot10^{-12}$ Ки/л.

До недавнего времени основным источником искусственного трития были испытания термоядерного оружия. В 1973 г. удельная активность трития в дождевой воде северного полушария была до $1{,}6\cdot10^{-9}$ Ки/л. Прекращение испытаний ядерного оружия в атмосфере сопровождается постепенным уменьшением его удельной активности.

В реакторах АЭС тритий образуется:

1) непосредственно при делении ядер горючего, как продукт тройного деления;
2) в результате (n,γ)-реакции на дейтерии, находящемся в теплоносителе – воде;
3) при захвате нейтронов ядрами бора или лития, находящимися в теплоносителе (борное регулирование);
4) в результате различных реакций быстрых нейтронов с конструкционными материалами активной зоны.

В реакторах ВВЭР при борном регулировании основной является реакция $^{10}B(n,\gamma)T$, ее вклад в образование трития около 85 %.

В реакторах РБМК основным процессом генерации трития в реакторной воде является реакция $D(n,\gamma)T$. Она приводит к удельной активности трития в воде, равной $4\cdot10^{-7}$ Ки/л. Дополнительно тритий образуется в контуре охлаждения СУЗ РБМК ($5\cdot10^{-6}$ Ки/л) и в газовом контуре ($6\cdot10^{-7}$ Ки/л). Полезно отметить, что в воде контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) и контура охлаждения СУЗ удельная активность трития ниже допустимой концентрации (ДКв), установленной НРБ–76/87 для воды (ДКв трития для воды составляет $3{,}2\cdot10^{-6}$ Ки/л). Если бы эта вода не содержала других, кроме трития, радионуклидов, она была бы пригодна для питья.

Газовые выбросы АЭС не подвергаются очистке от трития. Обусловлено это тем, что на АЭС с реакторами любого типа мощность выброса трития такова, что в приземном воздухе создается концентрация его в $10^5 \div 10^7$ раз меньшая ДКв. Поэтому различные разговоры о необходимости или целесообразности постоянного измерения мощности выброса трития лишены смысла, так же как разговор о необходимости рассматривать тритий, наряду с другими радионуклидами при расчете ПДК.

Тритий относится к так называемым глобальным, т. е. загрязняющим всю атмосферу нашей планеты. При работе АЭС только небольшая его доля поступает в атмосферу, полностью тритий, образовавшийся при делении ядерного горючего, выделяется при переработке отработавшего ядерного топлива. При прогнозируемом развитии ядерной энергетики в мире активность трития в атмосфере к 2010 году будет в 4 раза меньше, чем в 1963 году, когда глобальное загрязнение тритием определялось ядерными испытаниями.

Углерод-14 образуется как в природных процессах, так и в результате деятельности человека. В природе ^{14}C постоянно образуется в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия космических нейтронов с азотом. В облачном бассейне Земли давно установилось равновесное состояние, в основном (90 %) ^{14}C сосредоточен в глубинных слоях воды в океане,

в биосфере находится около 4 %. В организм человека ^{14}C поступает главным образом с пищей, обусловливает дозу на все тело около 15 мкбэр/год.

Основными поставщиками ^{14}C на АЭС являются реакции активации на ядрах мишени (атомы C, N и B), которые присутствуют в активной зоне и отражателе. В реакторах ВВЭР ^{14}C образуется, главным образом, в теплоносителе в результате реакций $^{17}O(n,\gamma)^{14}C$ и $^{14}N(n,p)^{14}C$.

В реакторах РБМК в основном реакции $^{13}C(n,\gamma)^{14}C$ и $^{14}N(n,p)^{14}C$. Наработка ^{14}C заметно меньше, чем трития.

Таким образом, ^{14}C в реакторах АЭС образуется в небольших количествах, поэтому мощность выброса также невелика. Поступает ^{14}C в атмосферу в виде различных химических соединений, но, главным образом, в виде $^{14}CO_2$, и частично ^{14}CO, $^{14}CH_4$. При тщательных измерениях ^{14}C, поступивших в атмосферу с АЭС, можно заметить на фоне глобального ^{14}C, однако его удельная активность составляет 30÷40 % фоновой. По этой причине нет надобности ни в контроле за мощностью выброса ^{14}C в вытяжной трубе АЭС, ни в наблюдении за его удельной активностью в воздухе.

Выход трития может быть уменьшен за счет концентрации тритированной воды и хранения ее в баках в течение длительного времени. Для ограничения выхода ^{85}Kr уже разработаны такие технологические процессы, как криогенная дистилляция, фтористоуглеродная и углеродная адсорбция. Выделенный ^{85}Kr может быть заключен в газгольдеры или связан в металлической матрице. ^{85}Kr химически инертен, в результате чего он вдыхается и вновь выдыхается наружу.

Применение низкотемпературной ректификации позволит превратить $^{14}CO_2$ в углекислый кальций, который может храниться в течение длительного времени.

Радионуклид ^{129}I улавливается фильтрами из азотнокислого серебра с эффективностью 93,9 %.

Основные радиоактивные выбросы связаны с работой установок регенерации топлива и установок по обработке радиоактивных отходов. При этом наиболее существенный вклад в суммарную радиоактивность вносят T, ^{85}Kr, ^{14}C, ^{129}I, ^{137}Cs, в меньшей степени другие β-активные продукты деления, а также α-активные уран, плутоний и другие аэрозоли трансурановых элементов.

К 2000 году дополнительное радиологическое воздействие на человека из-за накопления T, ^{85}Kr и ^{14}C (полный ЯТЦ) составит:

Доза облучения, мкЗв/год	T	^{85}Kr	^{14}C
Для всего организма	0,15	0,25	1,4
Для кожного покрова	–	9	–
Для легких	–	0,5	–

Для сравнения, в США средняя доза облучения всего организма человека из-за естественного фона излучения равна 0,7÷2,2 мЗв/год.

Выгорание ядерного топлива

Рассмотрим характеристики выгорания ядерного топлива [2].

Количество разделившегося ^{235}U за время t (сут) работы на мощности N (МВт), т. е. при энерговыработке $Q = N{\cdot}t$ (МВт·сут):

$$m_{\text{дел}} = 1{,}05N{\cdot}t = 1{,}05Q, \text{ г}, \tag{3.37}$$

где 1,05 – масса урана (г), который необходимо разделить, чтобы получить энергию 1 МВт·сут; для ^{239}Pu – 1,07 г/(МВт·сут).

Количество выгоревшего в течение времени t (сут) при энерговыработке Q:

$$m_{\text{выг}} = 1{,}05(1+\alpha)N{\cdot}t, \text{ г}. \tag{3.38}$$

Для ^{235}U $m_{\text{выг}} = 1{,}23N{\cdot}t$, г.

Скорость выгорания для ^{235}U

$$\frac{dm_{\text{выг}}}{dt} = 0{,}051N, \text{ г/ч}. \tag{3.39}$$

Средняя глубина выгорания $\overline{Z}$ определяется как количество энергии, полученной с единицы массы топлива, загруженного в реактор за время его пребывания в активной зоне:

$$\begin{aligned} &\overline{Z} = Q/m_{топл} = Nt/m_{топл}, \text{ МВтЧсут/кг};\\ &\overline{Z} = P_{топл}/t, \ кг/м;\\ &\overline{Z} = 1{,}34\cdot 10^{-6}\frac{P_{топл}t}{C_5}, \end{aligned} \tag{3.40}$$

где Pтопл – энергонапряженность топлива.

В современных ВВЭР с обогащением 3÷5 % при кампании 2÷3 года с использованием частичных перегрузок $\overline{Z}$ достигает значения 30÷40 МВт·сут/кг. В быстрых и высокотемпературных ЯР $\overline{Z}$ =100÷150 МВт·сут/кг.

Глубину выгорания можно определить из отношения масс выгоревшего нуклида к загруженному топливу:

$$\begin{aligned} &\overline{Z}_1 = m_{выг}/m_{топл}, \ кг/м;\\ &\overline{Z}_1 = 1{,}23\overline{Z}, \ кг/м;\\ &\overline{Z} = \overline{Z}_1, \ \ МВт\cdot сут/кг, \quad или \ \ \overline{Z} = 0{,}81\overline{Z}_1 \ МВт\cdot сут/кг;\\ &\overline{Z}_2 = 0{,}1\overline{Z}_1 \,\%. \end{aligned} \tag{3.41}$$

Иногда глубину выгорания характеризуют массой шлаков, накапливающихся в 1 т топлива:

$$Z_{\text{шл}} = Z_1. \tag{3.42}$$

Схема образования и распада различных нуклидов и высших актинидов, характерных для уран-плутониевого и торий-уранового циклов представлены во многих книгах.

В случае ^{235}U/^{238}U-топливной композиции нуклиды урана, нептуния, плутония, америция и кюрия образуются на протяжении всего периода работы реактора.

В реакторах с ^{232}Th/^{233}U-циклом почти не образуется нуклидов плутония, америция и кюрия, но гораздо больше накапливается нуклидов урана, тория и протактиния.

Для практических расчетов можно выделить упрощенные цепочки:

$$^{235}_{92}\mathrm{U}+n\rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U}\ (15\ \%) + \text{осколки}\ (85\ \%);$$

$$^{238}_{92}\mathrm{U}+n\rightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U}\xrightarrow[T_{1/2}=23\ \text{мин}]{\beta^{\pm}} {}^{239}_{93}\mathrm{Np}\xrightarrow[T_{1/2}=2{,}3\ \text{дня}]{\beta^{\pm}} {}^{239}_{94}\mathrm{Pu};$$

$$^{239}_{94}\mathrm{Pu}+n\rightarrow {}^{240}_{94}\mathrm{Pu}\ (28\ \%) + \text{осколки}\ (72\ \%);$$

$$^{240}_{94}\mathrm{Pu}+n\rightarrow {}^{241}_{94}\mathrm{Pu};$$

$$^{241}_{94}\mathrm{Pu}+n\rightarrow {}^{242}_{94}\mathrm{Pu}\ (26\ \%) + \text{осколки}\ (74\ \%).$$

Поглощение нейтронов, ведущее к накоплению нуклидов с A > 242 по влиянию на реактивность реактора не существенно, т. к. $\sigma_a^{242} \approx 30$ барн.

Разветвления цепочек образования актинидов происходят благодаря реакциям (n, γ), (n, $2n$), а также α- и β-распадам тяжелых ядер.

В целях упрощения задачи используем ряд предположений. Из-за малого выхода ^{241}Pu накопление изотопа ^{242}Pu не учитываем. Не будем учитывать ядра ^{239}U и ^{239}Np ввиду малости их времени жизни. Пренебрегаем радиоактивным распадом всех изотопов урана и плутония, а также изменением ядерной плотности ^{238}U.

Все величины, относящиеся к различным ядрам, будем записывать с соответствующими индексами: ^{235}U–5, ^{238}U–8, ^{239}Pu–9, ^{240}Pu–0, ^{241}Pu–1.

При указанных допущениях изменение состава ядерного горючего описывается следующей системой уравнений:

N_8 = const;

$$\frac{dN_5}{dt} = -\sigma_{a5} N_5 \Phi;$$

$$\frac{dN_9}{dt} = \sigma_{a8} N_8 \Phi - \sigma_{a9} N_9 \Phi - \varepsilon\eta_5 \sigma_{a5} N_5 (1-\varphi)\Phi + \varepsilon\eta_9 \sigma_{a9} N_9 (1-\varphi)\Phi;$$

$$\frac{dN_0}{dt} = (\sigma_{a9} - \sigma_{f9}) N_9 \Phi - \sigma_{a0} N_0 \Phi; \qquad (3.43)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \sigma_{a0} N_0 \Phi - \sigma_{a1} N_1 \Phi.$$

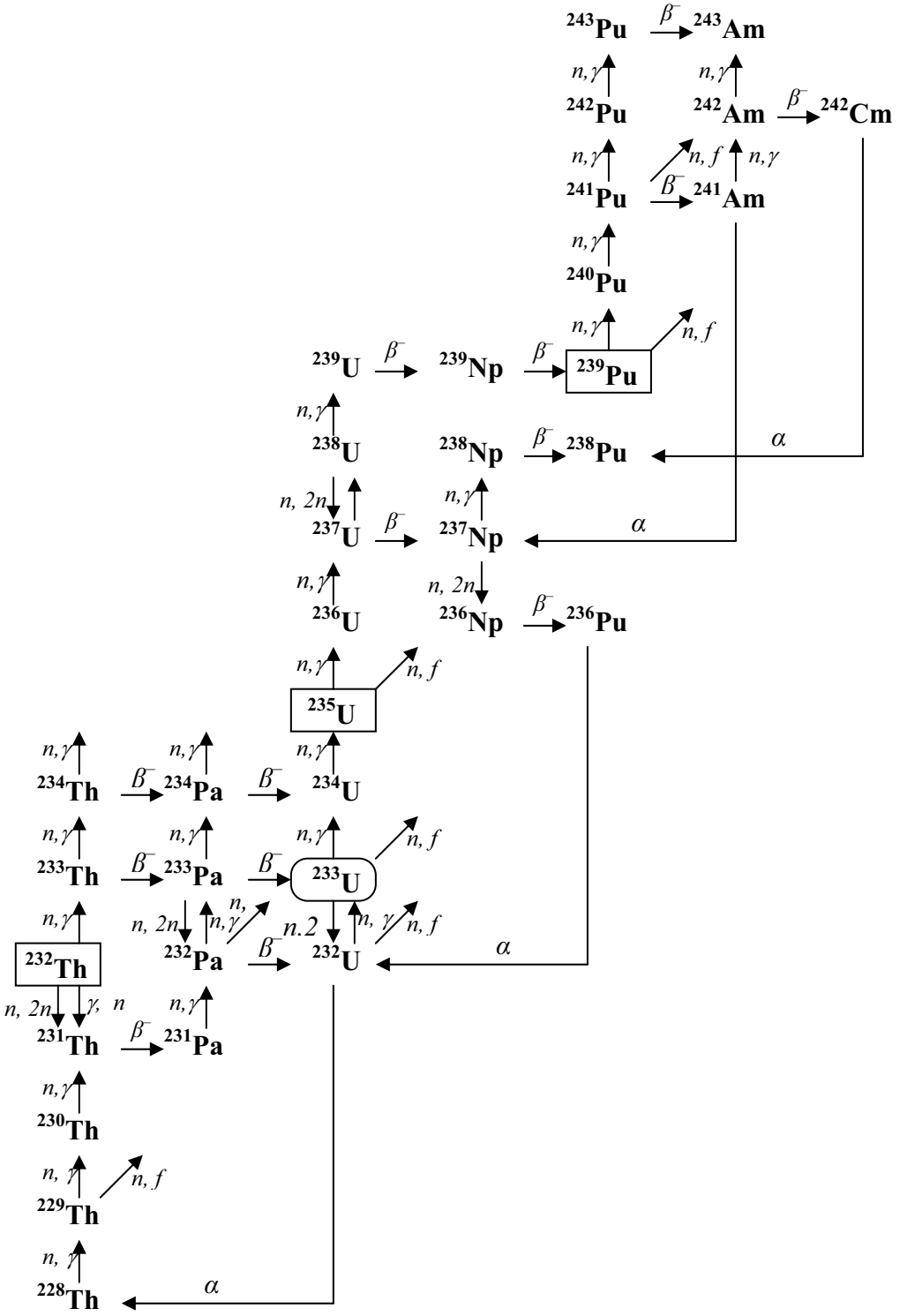


Рис. 3.16а. Схема ядерно-физических процессов, происходящих в топливе на основе композиций ^{235}U–^{239}Pu–^{232}Th

Правая часть каждого из уравнений системы (3.43) представляет собой алгебраическую сумму скоростей убыли ядер *i*-го нуклида вследствие поглощения и появления ядер этого же нуклида.

Для выгорания N_5 решение уравнения системы (3.43) будет

$$N_5(t) = N_{05}e^{-z}, \tag{3.44}$$

где N_{05} – начальная концентрация N_5.

При начальных условиях, что N_9=N_0=N_1=0 получаются следующие формулы, определяющие изменение концентрации изотопов плутония в процессе работы реактора:

$$N_9 = N_8^0 \frac{\sigma_8}{\sigma_9^*}\left(1-e^{-\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}z}\right)+\frac{\nu_5\sigma_f^5(1-\phi)N_5^0}{\sigma_5\left(\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}-1\right)}\left(e^{-z}-e^{-\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}z}\right);$$

$$N_0 = N_8^0\left(\sigma_9-\sigma_f^9\right)\left\{\frac{\sigma_8}{\sigma_9^*\sigma_0}\left(1-e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}\right)-\frac{\sigma_8}{\sigma_9^*\left(\sigma_0-\sigma_9^*\right)}\left(e^{-\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{(1-\phi)\nu_5\frac{\sigma_f^5}{\sigma_5}\frac{N_5^0}{N_8^0}}{\frac{\sigma_0^*}{\sigma_5}-1}\left[\frac{\sigma_5}{\sigma_0-\sigma_5}\left(e^{-z}-e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}\right)-\frac{\sigma_5}{\sigma_0-\sigma_9^*}\left(e^{-\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}\right)\right]\right\};$$

$$N_1 = N_8^0\sigma_0\left(\sigma_9-\sigma_f^o\right)\left\{\frac{\sigma_8}{\sigma_9^*\sigma_0}\left[\frac{1}{\sigma_1}\left(1-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)-\frac{1}{\sigma_1-\sigma_0}\left(e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)\right]-\right. \tag{3.45}$$

$$-\frac{\sigma_8}{\sigma_9^*\left(\sigma_0-\sigma_9^*\right)}\left[\frac{1}{\sigma_1-\sigma_9^*}\left(e^{-\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)-\frac{1}{\sigma_1-\sigma_0}\left(e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)\right]-$$

$$-\frac{(1-\phi)\nu_5\sigma_f^5\frac{N_5^0}{N_8^0}}{\sigma_9^*-\sigma_5}\left[\frac{\sigma_5^2}{(\sigma_0-\sigma_5)(\sigma_1-\sigma_5)}\left(e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)-\frac{\sigma_5^2}{(\sigma_0-\sigma_5)(\sigma_1-\sigma_0)}\left(e^{-z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)\right]-$$

$$\left.-\frac{(1-\phi)\nu_5\sigma_f^5\frac{N_5^0}{N_8^0}}{\left(\sigma_9^*-\sigma_5\right)\left(\sigma_0-\sigma_9^*\right)}\left[\frac{\sigma_5^2}{\left(\sigma_1-\sigma_9^*\right)}\left(e^{-\frac{\sigma_9^*}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)-\frac{\sigma_5^2}{\sigma_1-\sigma_0}\left(e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_5}z}-e^{-\frac{\sigma_1}{\sigma_5}z}\right)\right]\right\},$$

где $\sigma_9^* = \sigma_9\left[1-(1-\varphi)\nu_9\frac{\sigma_f^9}{\sigma_9}\right]$.

ν_{a9} – число нейтронов, возникающих при поглощении одного теплового нейтрона в ^{239}Pu.

На рис. 3.17 представлено примерное соотношение нуклидов плутония и урана при выгорании топлива.

Величину z, нужную для расчетов, можно сначала приближенно оценить по формулам (3.40), задавшись приближенно длительностью кампании.

Затем, имея значение z, вычисляем время работы реактора по следующей формуле:

$$P_t = \frac{7.5\cdot 10^5 C_5^0}{1-2(1-\varphi)}\left(1-e^{-z}\right)\left[1-0.3(1-\varphi)\varepsilon\right] + \frac{2.42\cdot 10^3}{1-2(1-\varphi)}\left(z-254C_9\right). \qquad (3.46)$$

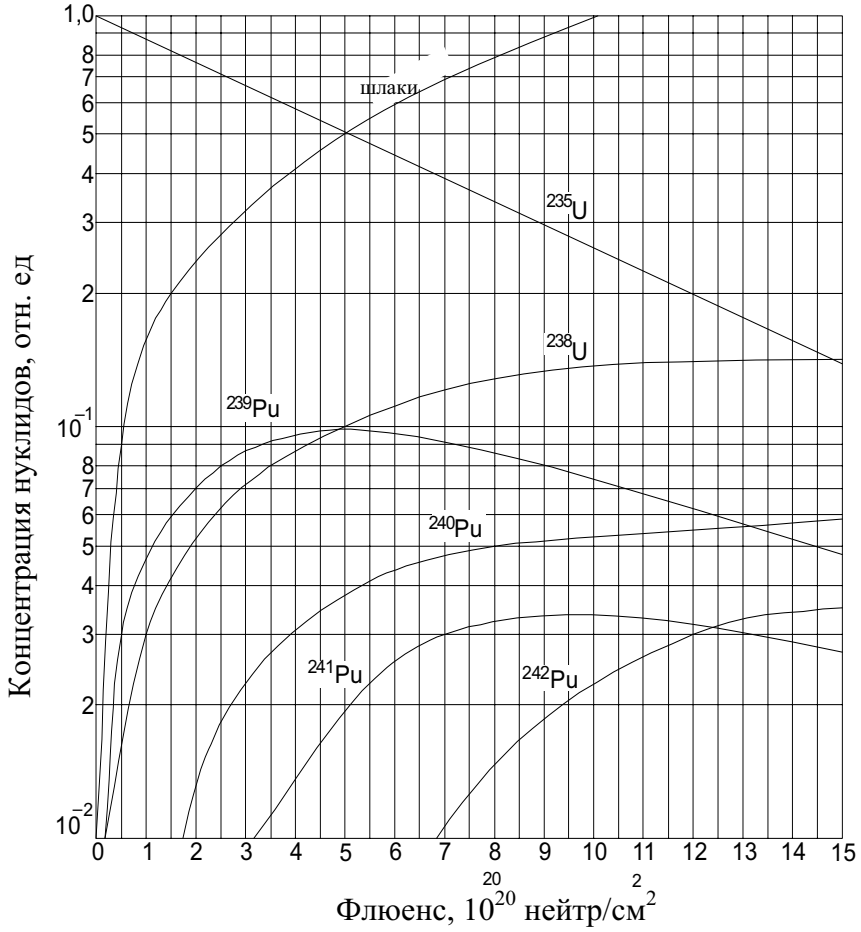


Рис. 3.17. Накопление различных нуклидов в процессе выгорания топлива [15]

Коэффициент воспроизводства

Для оценки относительной интенсивности образования вторичного делящегося вещества служит коэффициент воспроизводства КВ, который определяется как отношение числа образовавшихся ядер плутония к числу исчезнувших ядер:

$$KB = \frac{\sigma_8 N_8}{\sigma_5 N_5} + \varepsilon\eta_5(1-\varphi). \qquad (3.47)$$

Видно, что за счет выгорания N_9, N_1 концентрация шлаков становится равной числу начальных ядер N_5 при флюенсе нейтронов ~ 10^{21} нейтрон/см^2.

На рис. 3.17, 3.18 показано выгорание ^{235}U, образование ^{236}U и нуклидов плутония, а также ^{243}Am, ^{244}Cm, ^{90}Sr, ^{137}Cs в одной тонне топлива реактора LWR после работы в течение трех лет.

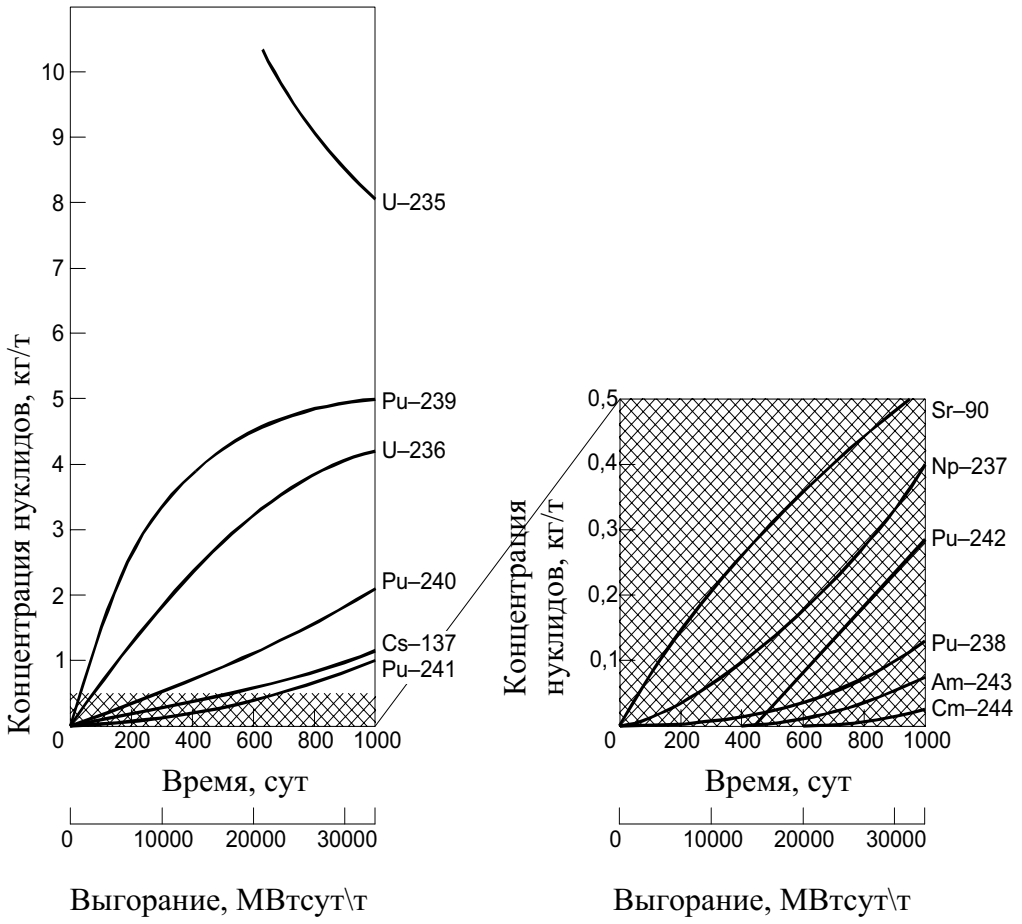


Рис. 3.18. Накопление актинидов и продуктов деления в ядерном топливе LWR после трех лет работы (центр KfK) [39]

Шлакование реактора

К шлакам относятся все стабильные и также долгоживущие радиоактивные продукты деления. Поглощающая способность шлаков после выключения реактора практически не изменяется (существенное исключение представляет ^{149}Sm, влияние которого на переходный процесс рассматривается отдельно), и потеря реактивности не восстанавливается.

Количественно шлакование определяется отношением числа тепловых нейтронов, поглощенных в шлаках, к числу тепловых нейтронов, поглощенных в уране

$$q_{шлi} = \frac{\Sigma_{ai}}{\Sigma_{aU}} = \frac{\sigma_{ai} N_i}{\sigma_{aU} N_U};\ q'_{шл} = \frac{\Sigma_{ai}}{\Sigma_{a5}}. \qquad (3.48)$$

Темп изменения концентрации i–того шлака находится в прямой зависимости от величины его сечения захвата σ_{ai}.

В связи с определяющим влиянием сечения поглощения на кинетику шлакования было предложено все шлаки разделить на три группы в зависимости от величины сечения поглощения:

1. К первой группе шлаков относится сильно поглощающие шлаки, для которых $\sigma_{ai} >> \sigma_{a5} \approx 700$ барн.

Таблица 3.4

Шлаки первой группы

Показатель	^{149}Sm	^{157}Gd	^{155}Eu	^{113}Cd	^{151}Sm
Выход, %	1,3	0,0074	0,03	0,014	0,445
Сечение, бн	74500	200000	14000	19500	10000

Относительное поглощение в шлаках первой группы равно $q'_{шлI} = 15{,}1 \cdot 10^{-3}$.

2. Ко второй группе (табл. 3.5) относятся шлаки, для которых $\sigma_{ai} \approx \sigma_{a5}$.

Таблица 3.5

Шлаки второй группы

Показатель	^{83}Kr	^{98}Tc	^{108}Rh	^{131}Xe	^{143}Nd	^{152}Sm	^{153}Eu
Выход, %	0,62	6,2	2,9	2,9	6,2	0,28	0,14
Сечение, бн	205	100	150	120	290	140	420

$$q'_{шлI} = 41{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot Z \quad (Z<0{,}2).$$

При Z>0,2

Z	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
$Sq'_{i \cdot 10^{-3}}$	8,0	15,6	22,6	29,3	36	50	62	80

3. К третьей группе (табл. 3.6) относятся все остальные шлаки со слабым поглощением $\sigma_{ai} < \sigma_{a5}$.

Таблица 3.6

Шлаки третьей группы

Показатель	^{82}Kr	^{85}Kr	^{95}Mo	^{100}Ag	^{127}I	^{129}I	^{132}Cs
Выход, %	0,3	0,32	6,3	0,028	9,25	1,00	6,5
Сечение, бн	45	15	13	85	6	27	29

Показатель	^{139}La	^{141}Pr	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{147}Pm
Выход, %	6,3	5,7	6,0	4,0	3,2	2,6
Сечение, бн	8,5	11	5	52	10	90

$$q'_{шлIII} = 11{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot Z. \qquad (3.49)$$

Суммарное поглощение тепловых нейтронов шлаками всех групп

$$\sum_i q'_{шл} = (15{,}1 + 52{,}8 \cdot Z) \cdot 10^{-3}.$$

Добавка за счет поглощения замедляющихся нейтронов шлаками

$$\Delta q'_{рез} = 66 \frac{\nu_5 \sigma_{a5} N_5}{\xi \Sigma_s} \cdot \frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}^2} Z. \qquad (3.50)$$

В заключении отметим, что потеря реактивности, обусловленная шлакованием реактора, зависит от энергетического спектра нейтронов, конструкции активной зоны, состава материалов и т. д.

Расчет реактора в конце кампании

В результате изменений, которые происходят в изотопическом составе активной зоны в процессе работы реактора, меняется коэффициент размножения k_{∞}, квадрат диффузионной длины и, следовательно, эффективный коэффициент размножения $k_{эф}$.

Коэффициент размножения $k_{эф}$ в конце кампании может быть найден из выражения

$$k_{эф}^{к.к} = \frac{k_{\infty}^{к.к} e^{-B^2 \tau_{к.к}}}{1 + B^2 L_{к.к}^2}. \qquad (3.51)$$

Коэффициент размножения $k_{\infty}^{к.к}$ в конце кампании определяется так:

$$k_{\infty}^{к.к} = \eta^{к.к} \cdot \varepsilon^{к.к} \cdot \varphi^{к.к} \cdot \theta^{к.к}. \qquad (3.52)$$

Коэффициент $\eta^{к.к}$ вычисляется следующим образом:

$$\eta^{к.к} = \frac{\nu_f^5 \sigma_f^5 N_5^{к.к} + \nu_f^9 \sigma_f^9 N_9^{к.к}}{\sigma_{a5} N_5^{к.к} + \sigma_{a8} N_8 + \sigma_{a9} N_9^{к.к}}. \qquad (3.53)$$

Коэффициент θ рассчитывается по прежней методике, но предварительно вычисляются новые сечения поглощения в топливе, изменившиеся в результате отравления, шлакования, выгорания горючего и накопления плутония. Затем вычисляются величины $k_{\infty}(t)$, $k_{эф}(t)$. Если реактор обладает отрицательным температурным коэффициентом, то все эти расчеты вести для горячего реактора.

Реактор рассчитан правильно (правильно выбраны обогащение горючего, конструкция, размеры реактора, длительность кампании), если эффективный коэффициент размножения снижается до единицы.

В противном случае необходимо строить кривую $k(t)$ и найти такое значение $k(t)$, при котором $k = 1$. Эта точка и определяет теоретическую кампанию реактора.

Если срок работы реактора является явно нереальным, то необходимо принять новый вариант с новым обогащением или, не уменьшая обогащения, изменить размеры тепловыделяющих элементов.

3.3. Управление мощностью реактора

Расчет переходного процесса в ядерном реакторе сводится к совместному решению уравнений, описывающих изменение его мощности, температурного поля активной зоны, реактивности за счет температурных эффектов, а также за счет работы систем автоматического регулиро-

вания, аварийной защиты. Во многих случаях дополнительно к ним потребуется решение уравнений динамики теплообменных аппаратов, парогенераторов, трубопроводов, уравнений нестационарной гидравлики. Здесь ставится задача с привлечением относительно простых математических моделей проиллюстрировать различные стороны физики переходных нейтронно–физических процессов. При этом математические модели и описания процессов выбирались такими, чтобы они, несмотря на простоту и наглядность, были пригодны и достаточно точны для количественных экспресс–оценок различных параметров переходных процессов, потребность в которых часто возникает при эксплуатации установок.

Тепловыделение в ядерном реакторе возникает в результате деления ядер урана и плутония. Энергия, выделяющаяся в каждом акте деления, составляет около 200 МэВ, что эквивалентно $3{,}2\cdot10^{-17}$ Дж. Эта энергия слагается из нескольких составляющих. Главная ее часть – около 93 % – выделяется практически мгновенно при делении ядра. В эту часть входят кинетическая энергия осколков деления, энергия мгновенного γ–излучения, сопровождающего деление, энергия нейтронов деления. Это основная компонента мощности ядерного реактора пропорциональна числу делений в единицу времени. Ее изменение во времени описывается известными уравнениями нейтронной кинетики.

Меньшая часть мощности тепловыделения в ядерном реакторе (около 7 %) обусловлена β- и γ-распадом радиоактивных продуктов, возникающих в результате деления ядер топлива и радиационного захвата нейтронов ядрами материалов активной зоны.

Кинетика реактора

Рассмотрим уравнение кинетики ядерного реактора [3]:

$$l\frac{dn}{d\tau} = (\rho - \beta)n + \sum_i C_i\lambda_i\,; \tag{3.54}$$

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \beta_i n - C_i\lambda_i\,. \tag{3.55}$$

Эти уравнения можно вывести из уравнений нестационарной диффузии нейтронов, допуская, что все нейтроны в реакторе имеют одинаковую энергию, а относительные распределения потока нейтронов по радиусу и осевой координате реактора не изменяются во времени. Уравнения (3.54) и (3.55) могут быть получены и на основе более элементарных соображений; по сути дела, это – уравнения баланса нейтронов в реакторе. В этих уравнениях n можно интерпретировать как плотность нейтронов (число нейтронов в единице объема), совокупное число нейтронов в ректоре в данный момент времени, мощность реактора, поскольку при сделанных

допущениях это все величины пропорциональные друг другу. Для определенности в дальнейшем будем под n понимать мощность реактора. В (3.54) и (3.55) C_i – величины, пропорциональные концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i-й группы; λ_i – постоянная распада этих ядер; β_i – эффективная доля запаздывающих нейтронов i-й группы; τ – время; l – время жизни мгновенных нейтронов;

$$\beta = \sum_i \beta_i ; \tag{3.56}$$

ρ – реактивность:

$$\rho = \frac{k-1}{k}, \tag{3.57}$$

где k – эффективный коэффициент размножения нейтронов в реакторе, т. е. отношение количества нейтронов в нем в текущий момент времени к количеству нейтронов предыдущего поколения. В стационарном режиме работы реактора, когда все составляющие баланса нейтронов в совокупности компенсируют друг друга, $k = 1$, $\rho = 0$. В переходных режимах реактивность отклоняется от нуля.

В настоящее время принято описание всей совокупности ядер-предшественников запаздывающих нейтронов в реакторе шестью группами. Такое описание является достаточно точным для практических целей. Параметры запаздывающих нейтронов – постоянные распада ядер-предшественников и их выход по группам приведены в многочисленных справочниках и учебных пособиях для всех делящихся нуклидов. Поэтому не будем здесь приводить значения этих констант. Напомним только, что эффективная доля запаздывающих нейтронов при делении ^{235}U составляет 0,007, при делении ^{239}Pu – 0,0021. В быстром реакторе эффективная доля запаздывающих нейтронов может отличаться от этих значений, поскольку она рассчитывается с учетом относительного вклада делений всех нуклидов, находящихся в активной зоне, включая ^{238}U. Постоянные распада ядер-предшественников мало различаются для всех делящихся материалов. Они лежат для шести групп в диапазоне от 5 до 0,02 с$^{-1}$. Соответственно средние времена жизни запаздывающих нейтронов по группам (величины, обратные постоянным распада) составляют от 0,17 до 55 с. Иногда для приближенных оценок шесть групп запаздывающих нейтронов заменяют одной.

Решение (3.54) и (3.55) несложно для того случая, когда реактивность с нуля изменяется мгновенным скачком до ρ и далее остается постоянной. Такое решение приведено во многих источниках. Однако в практическом использовании оно довольно громоздко, так как при учете шести групп запаздывающих нейтронов требует нахождения корней уравнения седьмой степени. Поэтому не будем приводить это решение, а ограничимся

лишь некоторыми приближенными его вариантами для случаев, когда $\rho > \beta$ и $\rho < \beta$ при учете одной группы запаздывающих нейтронов.

Если $\rho > \beta$, то запаздывающие нейтроны оказывают слабое влияние на изменение мощности реактора и ими можно пренебречь. В этом случае

$$n = n_0 \exp\left[\frac{\rho - \beta}{l} \cdot \tau\right],$$

где n_0 – начальное значение мощности. Таким образом, в этом случае период реактора, т. е. время изменения мощности в e раз, равен

$$\tau_R = \frac{l}{\rho - \beta}.$$

Поскольку время жизни мгновенных нейтронов l – величина очень малая, то период реактора при разгоне на мгновенных нейтронах также очень мал даже при небольших превышениях ρ над β. Регламент эксплуатации, конструкция, система аварийной защиты реактора практически исключают возможность его разгона на мгновенных нейтронах. Поэтому в процессе эксплуатации не возникает необходимости каких-либо оценок подобных переходных процессов. В реальных переходных процессах реактивность при положительных ее отклонениях всегда значительно меньше эффективной доли запаздывающих нейтронов. В таких процессах скорости изменения мощности сравнительно невелики, поэтому левой частью (3.54) можно пренебречь и считать ее равной нулю. Это означает, что мы полагаем равным нулю время жизни мгновенных нейтронов. Если дополнительно к этому опишем запаздывающие нейтроны одной группой, то получим следующую зависимость мощности реактора от времени после ступенчатого изменения реактивности:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \bar{\rho}} \cdot \exp\left[\frac{\bar{\rho}\,\lambda\tau}{\beta - \bar{\rho}}\right] = \frac{\exp\left[\frac{\bar{\rho}\lambda\tau}{\beta - \bar{\rho}}\right]}{1 - \bar{\rho}}, \qquad (3.58)$$

где $\bar{\rho} = \rho / \beta$ – реактивность, выраженная в долях β. Как видим, в этом случае период реактора составляет

$$\tau_R = \frac{1 - \bar{\rho}}{\bar{\rho}\lambda}. \qquad (3.59)$$

В общем случае под периодом реактора понимают отношение его мощности к скорости ее изменения:

$$\tau_R = \frac{n}{dn / d\tau}. \qquad (3.60)$$

Если мощность реактора изменяется во времени не по экспоненциальному, а по любому другому закону, то период не является постоянной

величиной. В соответствии с (3.60) период может быть положительным и отрицательным. В стационарном режиме работы, когда скорость изменения мощности равна нулю, период стремится к бесконечности.

Выражение (3.58) показывает, что сразу после скачка реактивности мощность мгновенно (на самом деле за время, соизмеримое с l) изменяется с n_0 до $\frac{n_0}{1-\overline{\rho}}$ и далее растет или падает в зависимости от знака реактивности с периодом, определяемым по (3.59).

Изменение реактивности и мощности

Нужно сказать, что решение (3.58) в задачах, связанных с повседневной эксплуатацией, имеет ограниченное применение. В эксплуатационной практике гораздо чаще приходится отвечать на вопрос: «Как нужно изменять реактивность, чтобы обеспечить изменение мощности реактора по заданному закону?». В настоящее время большинство реакторов оснащается реактиметрами. Эксплуатационный персонал успешно пользуется этими приборами в режимах подъема и снижения мощности. Регламентами эксплуатации реакторов часто предусматривается режим подъема мощности с постоянным периодом, подъема и снижения мощности с постоянной скоростью.

Может возникнуть необходимость изменения мощности реактора во времени и по другим законам, например, кратковременного снижения или повышения ее с последующим восстановлением исходного значения. Во всех этих случаях управление реактором упрощается, если известны необходимые зависимости реактивности от времени, которые соответствуют заданным законам изменения мощности. Получим приближенное решение уравнений кинетики относительно реактивности $\overline{\rho}(\tau)$ при любой заданной функции $n(\tau)$. Поскольку решение предназначено для $\overline{\rho}<1$, левой частью (3.54) пренебрегаем, полагая ее равной нулю. При этом (3.54) можно переписать следующим образом:

$$\overline{\rho} = 1 - \sum_i \frac{\overline{C}_i \lambda_i}{n}. \qquad (3.61)$$

Здесь реактивность, как уже было сделано выше, выражена в долях β

$$\overline{C}_i = C_i \big/ \beta. \qquad (3.62)$$

Вначале получим изменение реактивности при подъеме или снижении мощности реактора с постоянной скоростью за время $\Delta\tau$ на заданную величину с последующим поддержанием ее на постоянном уровне (рис. 3.19):

при $\tau = 0$ $\qquad n = n_0$;

при $0 < \tau \le \Delta\tau$ $$n = n0 + \frac{\Delta n}{\Delta\tau} \cdot \tau ; \qquad (3.63)$$

при $\tau > \Delta\tau$ $$n = n0 + \Delta n = n1.$$

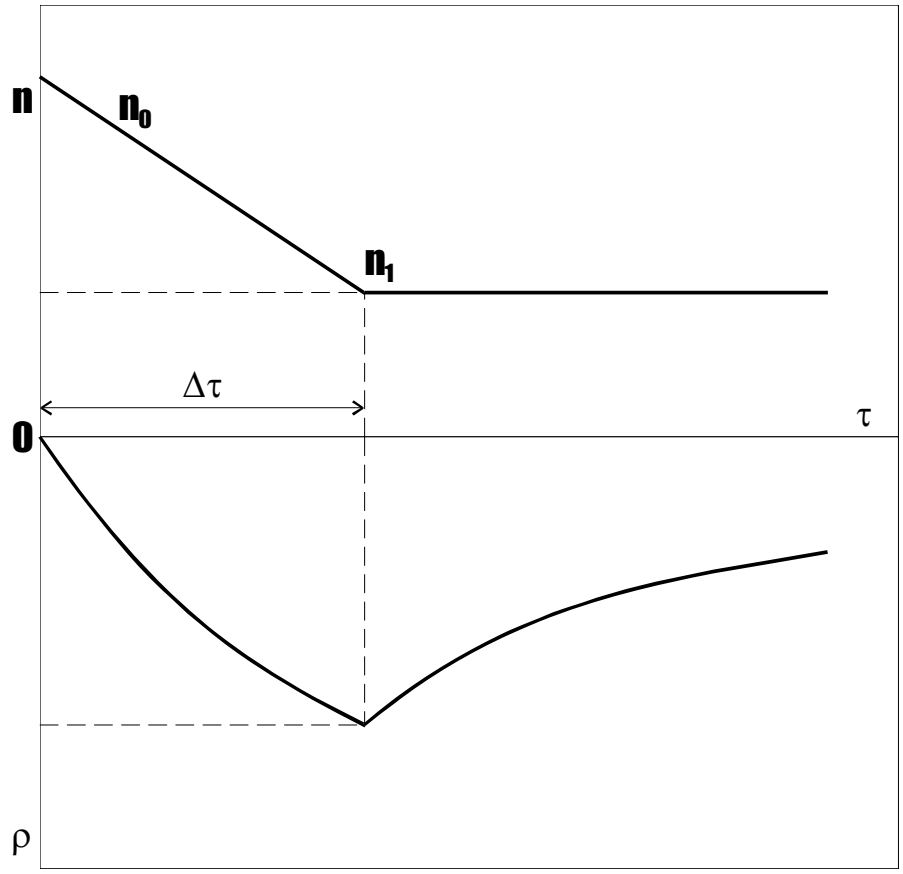


Рис. 3.19. Базовые зависимости мощности и реактивности от времени

Для такого изменения мощности из решения уравнения (3.55) получим следующие выражения для концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов *i*–й группы:

при $\tau = 0$ $$\overline{C}_{i,0} = \frac{\beta_i}{\beta} \cdot \frac{n_0}{\lambda_i} = a_i \cdot \frac{n_0}{\lambda_i} ; \qquad (3.64)$$

при $0 < \tau < \Delta\tau$ $$\overline{C}_i = \frac{a_i n}{\lambda_i} - \frac{\Delta n}{\Delta\tau} \cdot \frac{a_i \left(1 - e^{-\lambda_i \tau}\right)}{\lambda_i^2} ; \qquad (3.65)$$

при $\tau > \Delta\tau$ $$C_i = \frac{a_i n_1}{\lambda_i} - \frac{\Delta n}{\Delta\tau} \cdot \frac{a_i \left(1 - e^{-\lambda_i \Delta\tau}\right)}{\lambda_i^2} \cdot e^{-(\tau - \Delta\tau)\lambda_i} . \qquad (3.66)$$

Здесь $a_i = \beta_i / \beta$ – относительный выход запаздывающих нейтронов по группам; $\Delta n = n_1 - n_0$ – изменение мощности за время $\Delta\tau$.

Функция линейного отклика

Подстановка (3.64)–(3.66) в (3.61) [7] позволяет получить следующее выражение для изменения реактивности при заданном законе изменения мощности:

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta n}{n(\tau)} \cdot U_{\Delta\tau}(\tau). \tag{3.67}$$

При указанной подстановке учтено, что

$$\sum_{i=1}^{6} a_i = 1 \tag{3.68}$$

Функцию $U_{\Delta\tau}(\tau)$ назовем функцией линейного отклика, ибо она определяет такое изменение реактивности, откликом на которое является линейное изменение мощности в течение времени $\Delta\tau$ с последующим поддержанием постоянного ее значения. Эта функция в соответствии с (3.61), (3.64)–(3.66) задается следующими соотношениями:

при $0 \le \tau \le \Delta\tau$ $$U_{\Delta\tau}(\tau) = \sum_{i=1}^{6} \frac{a_i\left(1 - e^{-\lambda_i \tau}\right)}{\lambda_i \Delta\tau} \tag{3.69}$$

при $\tau > \Delta\tau$ $$U_{\Delta\tau}(\tau) = \sum_{i=1}^{6} \frac{a_i\left(1 - e^{-\lambda_i \Delta\tau}\right)}{\lambda_i \Delta\tau} \cdot e^{-\lambda_i(\tau - \Delta\tau)}. \tag{3.70}$$

Как видим, функция эта положительная при всех значения τ и стремится к нулю с увеличением τ. Максимального значения она достигает при $\tau = \Delta\tau$. Таким образом, в (3.67) знак реактивности ρ определяется знаком Δn: если $n_1 > n_0$, то $\bar{\rho} > 0$, в противном случае $\bar{\rho} < 0$. Для мгновенных изменений мощности, переходя к пределу $\Delta\tau \to 0$ в (3.70), получаем:

$$U_0(\tau) = \sum_{i=1}^{6} a_i e^{-\lambda_i \tau}.$$

При всех τ $U_{\Delta\tau}(\tau) \le 1$. Обратим также внимание на то, что в соответствии с (3.67) для $\Delta n > 0$

$$\bar{\rho} < U_{\Delta\tau}(\tau). \tag{3.71}$$

Из (3.67) получаем следующее значение конечного уровня мощности реактора n_1, которое достигается после ввода реактивности $\bar{\rho}$ за время $\Delta\tau$:

$$n_1 = \frac{n_0}{1 - \dfrac{\bar{\rho}}{U_{\Delta\tau}(\Delta\tau)}}. \tag{3.72}$$

Из (3.58) также получим значение уровня мощности n_1, которое достигается сразу же после мгновенного ввода реактивности:

$$n_1 = \frac{n_0}{1-\bar{\rho}}. \qquad (3.73)$$

Это выражение часто используется для оценок отклонения мощности не только при мгновенных, а и при достаточно быстрых изменениях реактивности, когда концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов фактически остаются постоянными. Это справедливо, если время изменения мощности значительно меньше среднего времени жизни запаздывающих нейтронов. Сравнение (3.72) и (3.73) показывает, что функция $U_{\Delta\tau}$ учитывает изменение вклада запаздывающих нейтронов за время снижения мощности. Функция $u_1 = U_{\Delta\tau}(\Delta\tau)$ изображена на рис. 3.20. Она представляет собой кривую, проведенную по максимумам кривых $U_{\Delta\tau}(\Delta\tau)$. Эта кривая показывает, что изменение вклада запаздывающих нейтронов довольно существенно даже в тех случаях, когда мощность меняется за несколько секунд. Например, для $\Delta\tau = 10$ с $u_1 = U_{\Delta\tau}(\Delta\tau) = 0{,}465$. Если $\Delta\tau = 1$ с, то $u_1 = 0{,}834$. Поэтому даже при $\Delta\tau = 1$ с оценка отклонений мощности по (3.73) будет иметь существенную погрешность. Такой оценкой, например, пользуются при определении мощности реактора, которая достигается сразу же после падения в его активную зону стержней аварийной защиты. Время падения стержней составляет 0,8÷1 с. Предпочтительнее и здесь пользоваться выражением (3.72), которое не дает указанной погрешности.

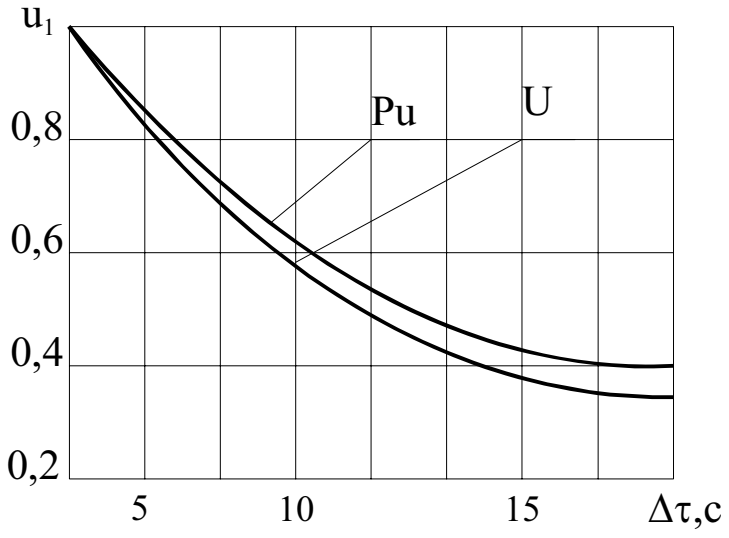


Рис. 3.20. Функция линейного отклика u_1

На рис. 3.20 функции $u_1(\Delta\tau)$ построены для урана и плутония. Разница между ними не превышает 10÷12 %. Это означает, что примерно

такую же относительную погрешность будет давать реактиметр, настроенный на параметры плутония, при его использовании в реакторе, работающем на уране, и наоборот. При этом «плутониевый» реактиметр завышает абсолютное значение реактивности, а урановый занижает.

Расчёт закона изменения реактивности

Введенные выше функции линейного отклика $U_{\Delta\tau}$ можно использовать для простого расчета законов изменения реактивности, соответствующих произвольным функциям изменения мощности реактора во времени. Для этого достаточно кривую изменения мощности $n(\tau)$ приближенно описать кусочно-линейной или кусочно-постоянной функцией. Обозначим изменение мощности на k–й ступени Δn_k, а значение мощности при $\tau_k = k\Delta\tau - n_k$. На рис. 3.21 приведена кусочно-линейная аппроксимация зависимости мощности от времени, применяемая при расчете реактивности.

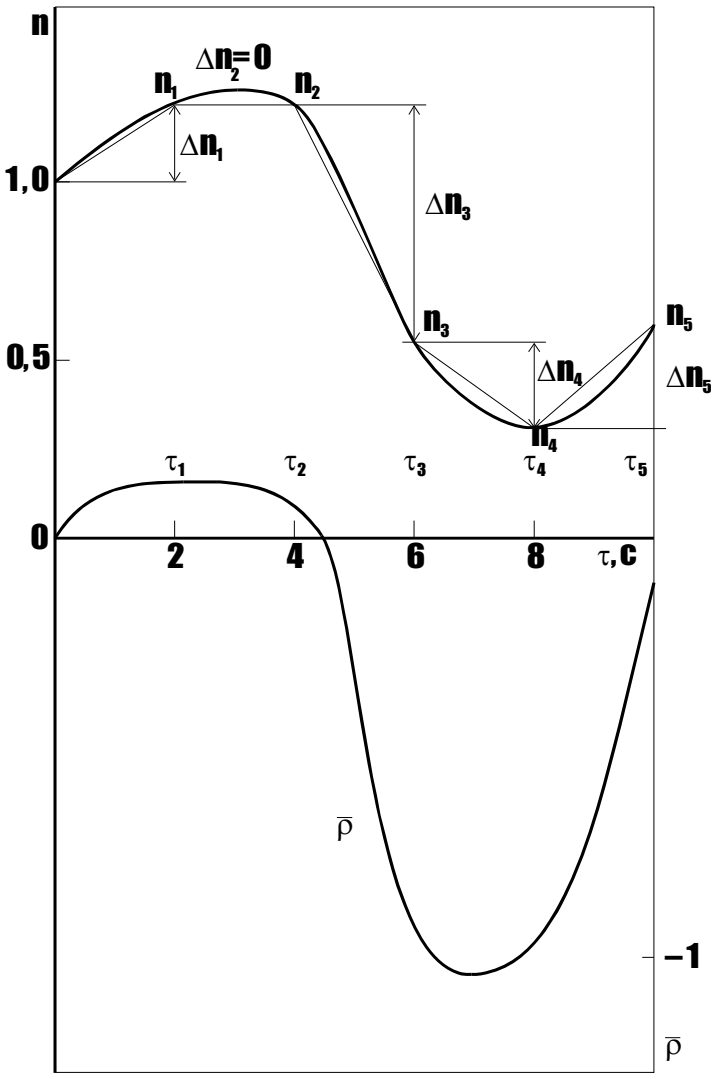


Рис. 3.21. Кусочно-линейная аппроксимация

Дополнительно для упрощения записи введем следующие обозначения:

$$U_{\Delta\tau}(\tau_k) = u_k\,; \tag{3.74}$$

$$U_0(\tau_k) = u_{0k}\,. \tag{3.75}$$

В этой записи предполагается, что функции $U_{\Delta\tau}$, U_0 задаются с постоянным шагом по времени, равным $\Delta\tau$.

Опуская промежуточные выкладки, которые несложно произвести с помощью (3.65)–(3.66), записываем сразу конечные выражения для реактивности $\bar{\rho}_m$ в моменты времени $\tau = m\Delta\tau$. При кусочно-линейной аппроксимации $n(\tau)$:

$$\bar{\rho}_m = \sum_{k=1}^{m} \frac{\Delta n_k}{n_m} \cdot u_{m-k+1}\,. \tag{3.76}$$

При кусочно-постоянной аппроксимации $n(\tau)$ изменение реактивности является разрывной функцией времени.

Реактивность на m-м шаге по времени до мгновенного изменения мощности:

$$\bar{\rho}_{m1} = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\Delta n_k}{n_m} \cdot u_{0_{m-k}}\,. \tag{3.77}$$

Реактивность на m-м шаге по времени после мгновенного изменения мощности:

$$\bar{\rho}_{m2} = \sum_{k=0}^{m} \frac{\Delta n_k}{n_m} \cdot u_{0_{m-k}}\,. \tag{3.78}$$

Можно получить более общее выражение для вычисления реактивности, которое сводится к частным случаям (3.76)–(3.78). Полагаем, что зависимость мощности от времени $n(\tau)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией с неравномерным шагом по времени $\Delta\tau_k$. В этом случае

$$\tau_m = \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_k\,. \tag{3.79}$$

К сожалению, в выражении для $\bar{\rho}$ теперь нельзя воспользоваться экономными обозначениями (3.74), (3.76), так как входящие в эти выражения функции линейного отклика будут относиться к различным $\Delta\tau$. Поэтому приходится возвращаться к исходному, более полному их обозначению.

Итак,

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n_m} \sum_{k=1}^{m} \Delta n_k U_{\Delta\tau}(\tau_m - \tau_k + \Delta\tau_k).$$

В предельных случаях при

$$\Delta\tau_k \to 0 \qquad\qquad U_{\Delta\tau_k} = U_0\,.$$

Нужно учитывать, что при $\tau = 0$ функция $U_0(0)$ разрывная: она имеет два значения – 0 и 1. Тем самым она описывает мгновенное изменение реактивности, соответствующее скачку мощности.

В качестве примера рассчитаем изменение реактивности при изменении мощности, изображенном на рис. 3.21. Последовательные значения мощности, заданные с интервалом $\Delta\tau$=2 с, а также взятые из таблиц значения функции линейного отклика u_k в соответствующие моменты времени приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Последовательные значения мощности реактора, функций линейного отклика, реактивности. Пример расчета

K	τ, с	n_k	Δn_k	u_k	$\bar{\rho}_k$	$\bar{\rho}_k$,*
0	0	1,0	0	0	0	0
1	2	1,4	0,4	0,761	0,217	0,214
2	4	1,4	0	0,529	0,151	0,143
3	6	0,6	–0,8	0,411	–0,741	–0,779
4	8	0,4	–0,2	0,337	–1,102	–1,102
5	10	0,7	0,3	0,268	–0,131	–0,116

В соответствии с (3.76):

$$\bar{\rho}_1 = \frac{0,4}{1,4} \cdot 0,761 = 0,217;$$

$$\bar{\rho}_2 = \frac{0 \cdot 0,761 + 0,4 \cdot 0,529}{1,4} = 0,151;$$

$$\bar{\rho}_3 = \frac{-0,8 \cdot 0,761 + 0 \cdot 0,529 + 0,4 \cdot 0,411}{0,6} = -0,741;$$

$$\bar{\rho}_4 = \frac{-0,2 \cdot 0,761 - 0,8 \cdot 0,529 + 0 \cdot 0,411 + 0,4 \cdot 0,337}{0,4} = -1,102;$$

$$\bar{\rho}_5 = \frac{0,3 \cdot 0,761 - 0,2 \cdot 0,529 - 0,8 \cdot 0,411 + 0 \cdot 0,337 + 0,4 \cdot 0,286}{0,7} = -0,131.$$

Вычисленные значения реактивности также сведены в табл. 3.7. В этой таблице $\bar{\rho}_k$ – последовательные значения реактивности при кусочно-линейной аппроксимации функции $n(\tau)$ с шагом по времени $\Delta\tau = 2$ с; $\bar{\rho}_k$,* – значения реактивности, полученные путем интегрирования уравнений кинетики (3.54), (3.55) на ЭВМ для функции $n(\tau)$, изображенной на рис. 3.21. Как видим, значения реактивности, полученные разными способами, близки одна к другой.

Выражения (3.69), (3.70) для функции линейного отклика при равномерной разбивке по времени ($\tau_k = k\Delta\tau$) можно переписать следующим образом.

Предварительно обозначим

$$\xi_i = e^{-\lambda_i \Delta\tau}. \tag{3.80}$$

Тогда

$$u_k = \sum_{i=1}^{6} \frac{a_i(1-\xi_i)}{\lambda_i \Delta\tau} \cdot \xi_i^{k-1}; \tag{3.81}$$

$$u_{0_k} = \sum_{i=1}^{6} a_i \xi_i^k. \tag{3.82}$$

Эти выражения довольно громоздки для расчетов в эксплуатационной практике, но они очень удобны для организации вычислений на ЭВМ. В совокупности с (3.76)–(3.78) они позволяют построить экономные программы для вычисления реактивности.

Запишем с помощью (3.76)–(3.78) и дополнительно введенных обозначений законы изменения реактивности для некоторых типовых функций.

1. Линейное изменение мощности от n_0 до n_1 за время $\Delta\tau$ и последующее поддержание ее на постоянном уровне. Последовательные значения реактивности с шагом по времени $\Delta\tau$ даются формулой (3.67), которая с учетом дополнительно введенных обозначений может быть переписана следующим образом:

$$\overline{\rho}_k = \frac{n_1 - n_0}{n_1} \cdot u_k. \tag{3.83}$$

2. Мгновенное изменение мощности на то же значение с последующим поддержанием постоянного ее уровня:

$$\overline{\rho}_k = \frac{n_1 - n_0}{n_1} \cdot u_{0_k}. \tag{3.84}$$

3. Подъем (или снижение) мощности с n_0 до n_1, за время $\Delta\tau$, снижение (или подъем) ее за то же время до исходного значения и последующее поддержание на неизменном уровне (треугольный импульс):

$$\overline{\rho}_k = \frac{n_1 - n_0}{n_1} \cdot \left(u_k - u_{k\pm1}\right); \tag{3.85}$$

$$\overline{\rho}_0 = 0;\ u_0 = 0;\ \tau = k\Delta\tau. \tag{3.86}$$

4. Изменение мощности с n_0 до n_1 мгновенным скачком на время $\Delta\tau$, мгновенный возврат ее до исходного значения и последующее поддержание на неизменном уровне (прямоугольный импульс):

$$\overline{\rho}_k = \frac{n_1 - n_0}{n_1} \cdot \left(u_{0,k} - u_{0,k-1}\right); \tag{3.87}$$

$$u_{0,1} = 0;\ u_{0,0} = \begin{cases} 0 \\ 1{,}0 \end{cases};\ \overline{\rho}_0 = \begin{cases} 0 \\ \left(n_1 \pm n_0\right) \big/ n_1 \end{cases};\ \tau = k\Delta\tau. \tag{3.88}$$

5. Изменение мощности по экспоненциальному закону:

$$n = n_0 \cdot e^{\tau/T}. \tag{3.89}$$

Выберем $\Delta\tau < T$;

$$n_k = n_0 \left(e^{\Delta\tau/T}\right)^k = n_0 \varphi^k; \tag{3.90}$$

$$\varphi^k = e^{\Delta\tau/T}. \tag{3.91}$$

Из (3.76) получаем:

$$\bar{\rho}_k = (\varphi - 1) \sum_{m=1}^{k} u_m \varphi^{-m}. \tag{3.92}$$

Сравним решение (3.92) с точным решением. Последнее получаем, интегрируя уравнения (3.54), (3.55) для функции $n(\tau)$, заданной выражением (3.89). В этом случае

$$\bar{\rho} = \frac{l}{T} + \sum_{i=1}^{6} a_i \frac{1 - e^{-\tau\left(\lambda_i + 1/T\right)}}{1 + \lambda_i T}. \tag{3.93}$$

Слагаемым l/T в этом выражении можно пренебречь из-за его малости. При больших τ, когда $e^{-\tau\left(\lambda_i + 1/T\right)} \to 0$,

$$\bar{\rho} = \sum_{i=1}^{6} \frac{a_i}{1 + \lambda_i T}. \tag{3.94}$$

Это известная формула «обратных часов», определяющая связь между реактивностью и установившимся периодом.

Из (3.92) при $k \to \infty$ получаем аналог этой формулы

$$\bar{\rho} = (\varphi - 1) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{u_m}{\varphi^m}. \tag{3.95}$$

Несложно показать, что при достаточно малых $\Delta\tau$ формулы (3.94) и (3.95) эквивалентны.

Обратим внимание на то, что для подъема мощности реактора с постоянным периодом реактивность нужно монотонно увеличивать с 0 до значения, определяемого (3.94). Закон изменения реактивности во времени задается (3.92) и (3.93). Если же сразу ввести реактивность, соответствующую установившемуся периоду, то вначале период роста мощности будет короче заданного.

Расчёт закона изменения мощности

Функции линейного отклика можно использовать не только для расчета законов изменения реактивности по заданным функциям мощности от времени, но и для решения противоположной задачи – расчета мощности при заданной зависимости реактивности от времени.

В этом случае кривая изменения реактивности аппроксимируется не кусочно-линейной или кусочно-постоянной функцией, а суммой отрезков функций, отвечающих линейному отклику по мощности. Эти отрезки близки к линейным при выполнении условия $\bar{\rho} < u_{0,1}$. Это условие всегда можно выполнить выбором шага $\Delta\tau$. Сшивка в узлах разбиения обеспечивает непрерывность аппроксимирующей функции. Пусть $\bar{\rho}_0 = 0$, а значения реактивности в последовательных узлах разбиения $\bar{\rho}_1$, $\bar{\rho}_2$, … $\bar{\rho}_k$. Начальное значение мощности n_0. Если предположить, что изменение $\bar{\rho}$ в диапазоне от $\bar{\rho}_0 = 0$ до $\bar{\rho}_1$ таково, что мощность при этом изменяется по линейному закону, то в соответствии с (3.76) можно записать:

$$\frac{u_1(n_1 - n_0)}{n_1} = \bar{\rho}_1 . \tag{3.96}$$

Отсюда

$$n_1 = \frac{n_0 u_1}{u_1 - \bar{\rho}_1} . \tag{3.97}$$

Функция линейного отклика u_1 выбирается по таблицам для необходимого шага разбиения по времени $\Delta\tau$.

Для второго шага также по (3.76)

$$\frac{n_2 - n_1}{n_2} u_1 + \frac{n_1 - n_0}{n_1} u_2 = \bar{\rho}_2 . \tag{3.98}$$

В результате

$$n_2 = \frac{n_1 u_1 - (n_{k-1} - n_0) u_2}{u_1 - \bar{\rho}_2} . \tag{3.99}$$

Для *k*–го шага

$$\frac{n_k - n_{k-1}}{n_k} u_1 + \frac{n_{k-1} - n_{k-2}}{n_k} u_2 + \ldots + \frac{n_1 - n_0}{n_k} u_k = \bar{\rho}_k . \tag{3.100}$$

В итоге для произвольного шага можно записать:

$$n_k = \frac{n_{k-1} u_1 - (n_{k-1} - n_{k-2}) u_2 - \ldots - (n_1 - n_0) u_k}{u_1 - \bar{\rho}_k} . \tag{3.101}$$

Несложно записать аналогичное выражение и на основе более общей формулы (3.70) для неравномерного шага по времени.

Для примера рассчитаем изменение мощности реактора при подъеме стержня автоматического регулирования с максимальной скоростью и последующим его опусканием до исходной позиции. Начальное значение мощности близко к минимально контролируемому ее значению. Зависимость реактивности и мощности реактора от времени при подъеме и последующем опускании поглощающего стержня автоматического

регулятора приведены на рис. 3.22, где 1 – реактивность; 2 – мощность (уточненный расчет); 3 – мощность (приближенный расчет).

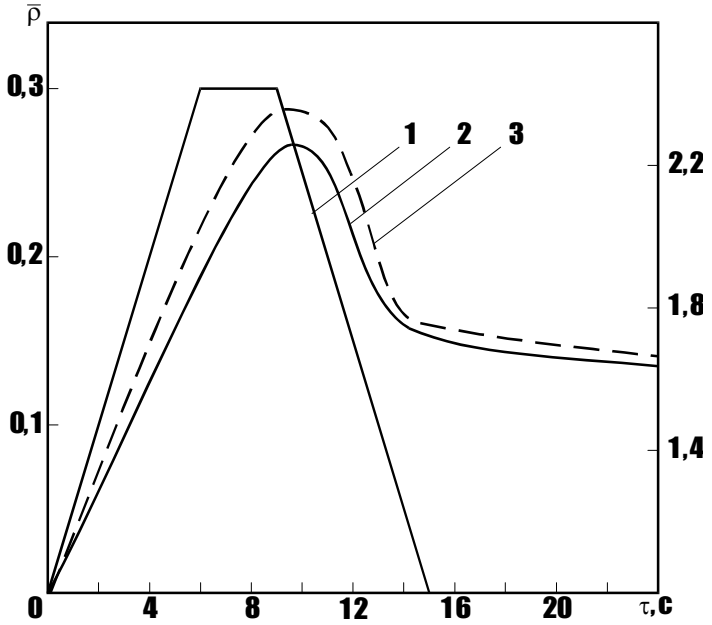


Рис. 3.22. Зависимость реактивности и мощности реактора от времени

Время подъема стержня составляет 6 с. В верхнем положении он удерживается 3 с, а затем также за 6 с опускается до начального положения. Расчет изменений мощности будем проводить с шагом по времени, равным 3 с. Последовательные значения реактивности, а также функции линейного отклика для такого $\Delta\tau$ представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Значения функций линейного отклика на различных шагах по времени

i	τ_i	$\overline{\rho}_i$	u_i
0	0	0	0,000
1	3	0,15	0,696
2	6	0,30	0,438
3	9	0,30	0,323
4	12	0,15	0,259
5	15	0,00	0,217
6	18	0,00	0,188

$$n_1 = \frac{n_0 u_1}{u_1 - \overline{\rho}_1} = \frac{1 \cdot 0{,}696}{0{,}696 - 0{,}15} = 1{,}275;$$

$$n_2 = \frac{1{,}275 \cdot 0{,}696 - (1{,}275 - 1) \cdot 0{,}438}{0{,}696 - 0{,}3} = 1{,}936;$$

$$n_3 = \frac{1{,}936 \cdot 0{,}696 - (1{,}936 - 1{,}275) \cdot 0{,}438 - (1{,}275 - 1) \cdot 0{,}323}{0{,}696 - 0{,}3} = 2{,}447.$$

Аналогично вычисляются $n_4 = 2{,}188$; $n_5 = 1{,}782$; $n_6 = 1{,}687$.

Полученная кривая изменений мощности сопоставляется на рис. 3.22 с расчетом $n(\tau)$, сделанным для тех же условий путем численного интегрирования уравнения кинетики на ЭВМ с малым шагом по времени. Результаты расчетов очень близки друг к другу. Это показывает хорошую точность расчета на основе функции линейного отклика.

Влияние нуклидного состава топлива на динамику переходных нейтронно-физических процессов

В случае, если в топливе присутствует только один основной делящийся нуклид, значения функций линейного отклика в процессе эксплуатации остаются практически неизменными. Если же топливо содержит несколько делящихся нуклидов, значения изменяются. Соответственно, изменяется и отклик нейтронной и тепловой мощности на идентичные возмущения реактивности. Например, в случае эксплуатации топлива $(U, Pu)O_2$ выгорание нуклидов U-235 и Pu-239 происходит различными темпами. Следовательно, соотношение долей запаздывающих нейтронов от продуктов деления U-235 и Pu-239 будет изменяться. При загрузке в реактор топлива $(U, Th)O_2$ изначально запаздывающие нейтроны образуются за счет продуктов деления U-235. В ходе эксплуатации концентрация U-235 падает, но «нарабатывается» новый делящийся нуклид U-235. Происходит изменение отношения N_{235}/N_{233} и соответственно β_{235}/β_{233}. Общая доля запаздывающих нейтронов, образованных при распаде продуктов деления как U-235, так и U-233, является функцией времени.

Таким образом, первой является задача определения в любой момент времени после начала эксплуатации топлива концентраций делящихся нуклидов в нем.

Рассмотрим относительно простую схему ядерных превращений, испытываемых нуклидом U-235 и приводящих к «наработке» изначально отсутствовавших делящихся нуклидов Pu-239 и Np-238 (см. рис. 3.23).

На схеме (рис. 3.23) указаны значения микроскопических сечений захвата σ, деления σ_f и резонансных интегралов I.

Обозначим концентрацию различных нуклидов $x^i(t)$. Индексы i для различных нуклидов следующие: $i = 1$ для U-235; $i = 2$ для U-236; $i = 3$ – Np-237; $i = 4$ – Np-238; $i = 5$ – Pu-238.

Схеме на рис. 3.23 соответствует следующая система уравнений для концентраций [11]:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} = -\left(\sigma_1 + \gamma I_1 \zeta_1\right)\Phi_T x^{(1)}; \qquad (3.102)$$

$$\frac{dx^{(k)}}{dt} = \left(\sigma_k^{k-1} + \gamma I_k^{k-1}\zeta_{k-1} + \frac{\lambda_k^{k-1}}{\Phi_т}\right)\Phi_т x^{(k-1)} - \left(\sigma_k + \gamma I_k \zeta_k + \frac{\lambda_k}{\Phi_T}\right)\Phi_T x^{(k)};\ k = 2, 3, 4, 5,$$

где σ_k, I_k характеризуют полное выгорание нуклида k, а σ_k^{k-1}, I_k^{k-1} – выгорание нуклида k–1 с превращением в нуклид k; λ_k – постоянная распада; $\Phi_т$ – плотность потока тепловых нейтронов; ζ_k – блокировка резонансного интеграла; γ –жесткость спектра:

$$\gamma = \frac{\nu\Sigma_f}{\xi\Sigma_s}. \qquad (3.103)$$

Здесь ν – число быстрых нейтронов на одно деление; Σ_f – макроскопическое сечение деления; $\xi\Sigma_s$ – замедляющаяся способность гомогенизированной среды.

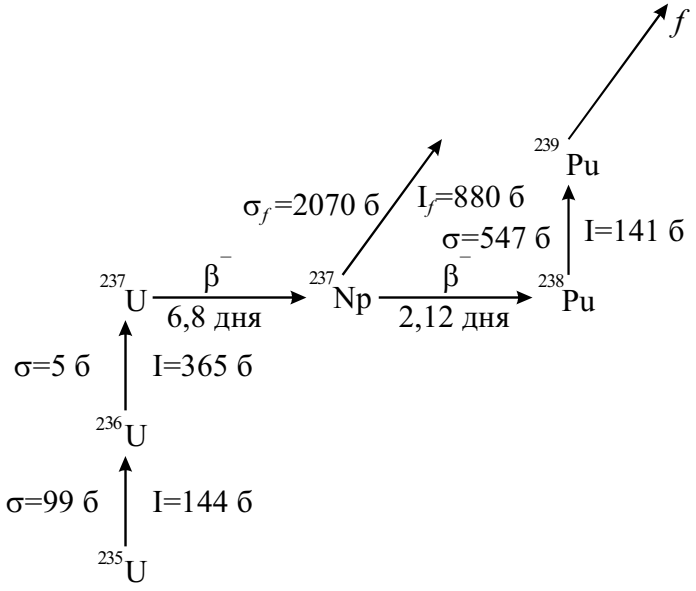


Рис. 3.23. Схема последовательных захватов и бета-распадов

Система уравнений (3.102), вообще говоря, нелинейная, поскольку ζ_k зависит от $\xi^{(k)}$. В общем случае ее решение может быть найдено численным методом. Начальными условиями являются условия для «стартовых» концентраций. Например, если изначально имелся только нуклид U-235, то $x^{(1)}(0)$ – заданная величина, $x^{(i)}(0) = 0$ для $i \neq 1$.

В настоящее время одной из важнейших задач, решаемых специалистами в области ядерной техники, является задача утилизации урана и плутония оружейной кондиции. Один из вариантов ее решения – использование U-235 и Pu-239 в топливных композициях, включающих «сырьевой» нуклид Th-232. Его облучение приводит к образованию делящегося нуклида U-233. В таких композициях выгорает и нарабатывается несколько делящихся нуклидов (см. рис. 4.6). Это U-235, Pu-239, Th-229, Pa-232, U-232, U-233, Np-228, Pu-241. В табл. 3.9 приведены характеристики запаздывающих нейтронов основных нечетно-четных нуклидов, делящихся тепловыми нейтронами [2].

Таблица 3.9

Параметры запаздывающих нейтронов

Номер группы	$T_{1/2}$, с	E_n, кэВ	Выход запаздывающих нейтронов на деление, 10^{-2}		
			^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
1	54–56	250	0,06	0,05	0,02
2	21–23	560	0,20	0,35	0,18
3	5–6	430	0,17	0,31	0,13
4	1,9–2,3	620	0,18	0,62	0,20
5	0,5–0,6	420	0,03	0,18	0,05
6	0,17–0,27		0,02	0,07	0,03
Полное число запаздывающих нейтронов на одно деление, 10^{-2}			0,66	1,58	0,61
Доля запаздывающих нейтронов, %			0,26	0,64	0,21

Здесь $T_{1/2}$ – период полураспада первых β-активных осколков деления, продукты распада которых являются излучателями запаздывающих нейтронов, E_n – энергия запаздывающих нейтронов. Постоянная распада для i–й группы запаздывающих определяется соотношением

$$\lambda_i = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^{(i)}}. \tag{3.104}$$

Табл. 3.9 показывает, что характеристики запаздывающих нейтронов для указанных нуклидов существенно различаются. Очевидно, что если «стартовая» топливная композиция включает U-235 и Th-232, то по мере выгорания U-235 и наработки U-233 будет происходить уменьшение доли запаздывающих нейтронов и, соответственно, уменьшение предельного значения освобождаемой реактивности.

Нуклидная кинетика описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dN_z^A}{dt} &= \Phi_\text{т}\left(\sigma_{n,\gamma}^{z,A-1} + \gamma I^{z,A-1}\right)N_z^{A-1} + \lambda_{\beta^-}^{z-1,A}N_{z-1}^A + \lambda_\alpha^{z-2,A-4}N_{z-2}^{A-4} - \\ &-\Phi_\text{т}\left(\sigma_{n,\gamma}^{z,A} + \gamma I^{z,A}\right)N_z^A - \lambda_{\beta^-}^{z,A}N_z^A - \lambda_\alpha^{z,A}N_z^A + \Phi_\text{т}\sigma_{n,2n}^{z,A-1}N_z^{A-1} - \\ &-\Phi_\text{т}\sigma_{n,2n}^{z,A}N_z^A - \Phi_\text{т}\sigma_{n,f}^{z,A}N_z^A.\end{aligned} \tag{3.105}$$

Здесь z и A – заряд ядра и атомная масса нуклида, для которого записано уравнение; σ – микроскопические сечения для соответствующих нуклидов (z, A) и для соответствующих реакций: (n,γ), (n,f), (n,2n); λ – постоянная распада для соответствующих нуклидов (z, A) и для соответствующих каналов распада: α-распад, β-распад. В системе уравнений (3.105) не учтена блокировка резонансных интегралов. Например, для U-234 имеет место следующее уравнение:

$$\frac{dN_{92}^{234}}{dt} = \Phi_T\left(\sigma_{n,\gamma}^{92,233} + \gamma I^{92,233}\right)N_{92}^{233} + \lambda_{\beta^{\pm}}^{91,234}N_{91}^{234} + \\ + \lambda_{\alpha}^{94,236}N_{94}^{236} - \Phi_T\left(\sigma_{n,\gamma}^{92,234} + \gamma I^{92,234}\right)N_{92}^{234}, \tag{3.106}$$

которое в конечно-разностной форме приобретает вид

$$\left(N_{92}^{234}\right)' = N_{92}^{234} + \Delta t \cdot F. \tag{3.107}$$

Здесь Δt – шаг последовательного интегрирования уравнений (3.105) по времени; N_{92}^{234} – ядерная концентрация U-234 в момент времени t, $\left(N_{92}^{234}\right)'$ – в момент времени $t+\Delta t$; F – правая часть уравнения (3.106), в которой значения концентраций соответствуют предыдущему шагу t. При $t = 0$ значения ядерных концентраций известны. При $t = \Delta t$ они определяются по выше изложенному алгоритму. При $t = 2\Delta t$ – по значениям для $t = \Delta t$ и так далее. Процедура вычислений легко реализуется на ПЭВМ.

Доли запаздывающих нейтронов определяются формулой

$$\beta_i = \sum_j \beta_i^{(j)} \frac{N_j \sigma_{n,f}^{(j)} \nu_f^{(j)}}{\sum_j N_j \sigma_{n,f}^{(j)} \nu_f^{(j)}};\ i = 1,6, \tag{3.108}$$

причем суммирование проводится по всем основным делящимся нуклидам, присутствующим в топливе. Изменение во времени ядерных концентраций нуклидов приводит к изменению значений β и, соответственно, значений функции линейного отклика. Последняя определяет динамику отклика нейтронно-физических характеристик на возмущения реактивности.

4. РАСЧЁТ ОБЪЁМНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПО ДЛИНЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА

4.1. Максимальные значения величин

Предполагая, что максимумы энерговыделения по высоте и радиусу активной зоны реактора (А3) совпадают и соответствуют положению – центр А3 ($z = 0$, $r = 0$) – максимальное значение объёмной плотности тепловыделения в топливе определяется соотношением

$$q_v^{\max} = q_v(z = 0, r = 0) = \frac{\overline{N} k_v}{n_{ТК} n_{твэл} \pi R_{ТТ}^2 H_{а.з}}, \tag{4.1}$$

где z и r – осевая и радиальная координаты, соответственно; $\overline{N}$ – тепловая мощность реактора; $n_{тк}$ – число рабочих технологических каналов (ТК); $n_{твэл}$ – число тепловыделяющих элементов (твэл) в тепловыделяющей сборке (ТВС); $R_{тт}$ – радиус топливной таблетки (ТТ); $H_{а.з}$ – высота активной зоны; k_v – коэффициент неравномерности энерговыделения по объёму А3.

Последний определяется произведением коэффициентов неравномерности по высоте k_z и по радиусу k_r:

$$k_v = k_z k_r, \tag{4.2}$$

$$k_z = 1{,}57\left[1 + \frac{2\delta_{эф}}{H_{аз} + 2\delta_{эф}}\right]^{-1}, \tag{4.3}$$

$$k_r = 2{,}32\left[1 + \frac{\delta_{эф}}{R_{аз} + 2\delta_{эф}}\right]^{-1}, \tag{4.4}$$

где $R_{а.з}$ – радиус активной зоны; $\delta_{эф}$ – эффективная добавка. Значение $\delta_{эф}$ в первом приближении можно положить равным значению длины миграции в материале отражателя.

Максимальное значение линейной плотности тепловыделения определяется соотношением

$$q_l^{\max} = q_l(z = 0, r = 0) = q_v^{\max} \pi R_{ТТ}^2, \tag{4.5}$$

предполагая, что тепловой поток в осевом направлении пренебрежимо мал по сравнению с таковым в радиальном направлении.

Исходя из этого максимальное значение поверхностного теплового потока определяется соотношением

$$q_s^{\max} = q_s(z=0, r=0) = q_v^{\max} R_{TT}/2. \quad (4.6)$$

Единицы измерения вышеопределённых величин в системе СИ следующие:

$$[q_v] = \text{Вт/м}^3,\ [q_l] = \text{Вт/м},\ [q_s] = \text{Вт/м}^2.$$

Следует различать тепловую мощность реактора (или среднюю мощность) $\overline{N}$ и максимально допустимое значение мощности $N_{\max}$, являющееся пределом теплотехнической надёжности эксплуатации. По определению

$$k_v = \frac{N_{\max}}{\overline{N}}. \quad (4.7)$$

При регламентном изменении мощности реактора с уровня $\overline{N_1}$ на уровень $\overline{N_2}$, которое сопряжено с изменением значения k_v от k_{v1} до k_{v2}, новый уровень мощности не должен превышать значения:

$$\overline{N}_2 = \overline{N}_1 \frac{k_{v1}}{k_{v2}}. \quad (4.8)$$

Для реакторов типа ВВЭР и РБМК коэффициент k_v определяется соотношением:

$$k_v = k_r k_E k_z k_{TBC} k_{MEX} k_{MOЩ} k_{ПОГЛ}, \quad (4.9)$$

где коэффициент k_E учитывает кассеты с различным обогащением или различной глубиной выгорания топлива; k_{TBC} – неравномерность энерговыделения по ТВС; $k_{мех}$ – неравномерность теплового потока из-за технологических допусков на изготовление твэлов, неточности расчётных методик, перераспределения расходов и т. д.; $k_{мощ}$ – отклонения мощности, давления, температур, расхода; $k_{погл}$ – неравномерность, обусловленная наличием подвижных КР (консерваторов реактивности) в АЗ.

Типичные значения коэффициентов в реакторах ВВЭР-1000 и РБМК-1000 в начале кампании:

ВВЭР-1000

$k_r k_E = 1{,}35$; $k_z = 1{,}47$; $k_{TBC} = 1{,}16$; $k_{мех} = 1{,}15$; $k_{мощ} = 1{,}08$; $k_{погл} = 1{,}01$;

РБМК-1000

$k_r = 1{,}12$; $k_E = 1{,}2$; $k_z = 1{,}5$; $k_{TBC} = 1{,}1$; $k_{погл} = 1{,}15$.

4.2. Расчёт значений q_v, q_e и q_S по высоте наиболее энергонапряжённого (центрального) ТК

Пространственное распределение тепловыделения описывается произведением двух функций (косинус – по высоте, функция Бесселя – по радиусу):

$$q_v \sim \cos\left(\pi \frac{z}{H_{а.з}}\right) J_0\left(2{,}405 \frac{r}{R_{а.з}}\right), \tag{4.10}$$

где текущие значения координат изменяются в пределах:

$$-\frac{H_{а.з}}{2} \le z \le \frac{H_{а.з}}{2}; \qquad 0 \le r \le R_{а.з}.$$

Оно симметрично относительно центра А3:

$q_v = q_v^{\max}$ при $z = 0, \quad r = 0;$

$q_v = 0$ при $z = \pm\frac{H_{а.з}}{2}$ или $r = R_{а.з}$.

При расчёте ТК «разбивается» на участки, нумерация которых начинается от участка входа теплоносителя. Количество участков произвольно, но с целью уменьшения погрешностей расчёта не должно быть меньше 10. В общем случае, обозначим через *I* количество участков (чётное число). В этом случае индекс «1» соответствует входному участку, индекс «I» – выходному. Индексы «I/2» и «(I/2)+1» – участкам, граница между которыми соответствует координате z = 0. Для центрального ТК координата r = 0 и, следовательно,

$$q_v \sim \cos\left(\pi \frac{z}{H_{а.з}}\right). \tag{4.11}$$

Непрерывное косинусоидальное распределение по высоте заменяется кусочным. То есть, предполагается, что в пределах определённого участка ТК значения q_v, q_l и q_S неизменны и соответствуют координате, совпадающей с серединой участка:

$$q_{vi} \sim \cos\left(\pi \frac{z_i}{H_{а.з}}\right), \tag{4.12}$$

где *i* – индекс, соответствующий участку. Полагая длину всех участков ТК равной, получим:

$$\Delta z = \Delta z_i = const = \frac{H_{а.з}}{I}; \tag{4.13}$$

здесь Δz_i – длина любого участка ($i=\overline{1,I}$). Таким образом, координаты, соответствующие середине участков, определяются соотношениями:
для случая подвода ТН снизу А3

$$z_i = -\frac{H_{a.з}}{2}\left(1-\frac{2i-1}{I}\right); \tag{4.14}$$

для случая подвода ТН сверху А3

$$z_i = \frac{H_{a.з}}{2}\left(1-\frac{2i-1}{I}\right). \tag{4.15}$$

При этом

$$q_{v1} = q_{vI}\text{, так как } \cos\left(\pi\frac{z_1}{H_{a.з}}\right) = \cos\left(\pi\frac{z_I}{H_{a.з}}\right),$$

$$q_{v2} = q_{v(I-1)}\text{, так как} \cos\left(\pi\frac{z_2}{H_{a.з}}\right) = \cos\left(\pi\frac{z_{I-1}}{H_{a.з}}\right)$$

и так далее, до

$$q_{v(I/2)} = q_{v(I/2+1),}\text{ так как} \cos\left(\pi\frac{z_{I/2}}{H_{a.з}}\right) = \cos\left(\pi\frac{z_{(I/2+1}}{H_{a.з}}\right).$$

Таким образом, для определения значений q_{vi}, q_{li}, q_{Si} ($i=\overline{1,I}$) достаточно провести расчёт для половины участков и воспользоваться фактом симметрии распределения относительно координаты $z = 0$.

Результаты расчётов по п. 4.2 должны быть представлены в виде гистограмм: изменение величин q_v, q_l, q_S по ходу движения теплоносителя в ТК.

4.3. Расчёт температурного состояния ТН по длине ТК

Количество тепла, выделяющееся на отдельных участках и в центральном ТК

Количество тепла, выделяемое на *i*-м участке, определяется соотношением

$$Q_i = q_{li}\cdot\Delta z\cdot n_{\text{твэл}}. \tag{4.16}$$

Множитель $n_{\text{твэл}}$ в соотношении (4.16) учитывает то, что значение q_l на участках ТК рассчитывалось в расчёте на один твэл. Суммарное тепловыделение в центральном ТК:

$$Q_\Sigma = \sum_{i=1}^{I} Q_i = 2\sum_{i=1}^{I/2} Q_i\ . \tag{4.17}$$

Для определения погрешности проведённых ранее расчётов необходимо сравнить величину Q_Σ, полученную в дискретном представлении и в интегральном:

$$Q_\Sigma^* = 2q_l^{\max} \int_0^{H_{а.з}/2} \cos(\pi \frac{z}{H_{а.з}}) = \frac{2}{\pi} q_l^{\max} \cdot H_{а.з} \cdot n_{твэл}. \quad (4.18)$$

Погрешность вычислений:

$$\delta = \left| \frac{Q_\Sigma - Q_\Sigma^*}{Q_\Sigma^*} \right| \cdot 100\ \%. \quad (4.19)$$

Определение расхода ТН через центральный ТК

Если полагать, что величина теплоёмкости мало изменяется по ТК, то подогрев ТН в ТК может быть определён следующим образом:

$$\Delta t = t_{вых} - t_{вх} = \frac{Q_\Sigma}{G \cdot C_p}, \quad (4.20)$$

где C_p – удельное значение теплоёмкости теплоносителя при температуре $\bar{t} = 0{,}5(t_{вх} + t_{вых})$ и давлении в первом контуре реактора; G – расход. Единицы измерения в соотношении (5.5) следующие (система СИ):

$$[\Delta t] = [t] = {}^\circ C; \quad [Q_\Sigma] = Вт;$$

$$[G] = кг/с; \quad [C_p] = \frac{Дж}{кг \cdot К}.$$

Подогрев ТН в А3 Δt, °С известен и, таким образом, расход определяется соотношением:

$$G = \frac{Q_\Sigma}{\Delta t \cdot C_p}. \quad (4.21)$$

Изменение температуры и скорости ТН при движении в ТК

Подогрев ТН на каждом участке ТК определяется по соотношению

$$\Delta t_i = \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \quad (4.22)$$

где C_{pi} – удельная теплоёмкость ТН при температуре на i-м участке. Последняя ещё не определена, поэтому используется следующая процедура расчёта.

Температура ТН на i-м участке

$$\bar{t}_i = t_{i-1} + \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \quad (4.23)$$

где C_{pi} в первом приближении задаётся равной C_{pi-1}. Затем значение C_{pi} уточняется по соотношениям:

$$C_{pi} = f(\bar{t}_i), \quad \bar{t}_i = (t_i + t_{i-1})/2, \tag{4.24}$$

где функция $C_p = f(t)$ табулирована. После этого вычисление по (4.23) повторяется и определяется значение t_i с использованием уточненного значения C_{pi}.

Пример

Необходимо определить температуру ТН на 1-м участке. Входная температура $t_{вх}$ расход G и тепловыделение на 1-м участке Q_1 известны.

По табличным данным определяется значение $C_{p1} = C_{p.вх} = C_p(t_{вх})$. Затем вычисляется температура ТН на первом участке в первом приближении

$$t_1 = t_{вх} + \frac{Q_1}{G \cdot C_{p.вх}}.$$

Значение C_{p1} уточняется:

$$\bar{t}_1 = (t_1 + t_{вх})/2,$$
$$C_{pi} = C_p(\bar{t}_1).$$

Значение t_1, также уточняется:

$$t_1 = t_{вх} + \frac{Q_1}{G \cdot C_{p1}}.$$

Изменение температурного состояния ТН по длине ТК приводит к изменению плотности и, следовательно, скорости движения теплоносителя:

$$v_i = G/(f_i \cdot \gamma_i), \tag{4.25}$$

где f_i. – площадь проходного сечения ТК; γ_i – плотность ТН на i-м участке. Функция $\gamma = f(t)$ табулирована, а температура ТН на всех участках определена.

Площадь проходного сечения ТК определяется как разность между площадью поперечного сечения ТК и площадью поперечного сечения конструкционных элементов, размещённых в нём. В простейшем случае – цилиндрический ТК, на участках имеется $n_{твэл}$ без дистанционирующих элементов и др., получаем:

$$F = \pi\left(R^2_{ТК\,внутр} - n_{твэл} \cdot R^2_{твэл\,внеш}\right), \tag{4.26}$$

где $R_{ТК\,внут}$ – внутренний радиус трубы ТК; $R_{твэл\,внеш}$ – внешний радиус оболочки твэл.

4.4. Расчёт коэффициентов теплоотдачи с поверхности твэл

Для расчёта локальных значений коэффициентов теплоотдачи используется следующее соотношение:

$$\alpha_i^{\circ} = \frac{\lambda_i}{d_{эi}} \cdot Nu_i, \tag{4.27}$$

где Nu_i – критерий Нуссельта; λ_i – коэффициент теплопроводности ТН на *i*-м участке (функция температуры). Функция $\lambda = f(t)$ табулирована, значения t_i определены ранее, давление в первом контуре реактора известно.

Эквивалентный диаметр ТК на *i*-ом участке:

$$d_{эi} = \frac{4F_i}{\Pi_i}, \tag{4.28}$$

где Π_i – периметр ТК, омываемый на *i*-м участке теплоносителем. В простейшем случае – цилиндрический ТК, на участке имеется $n_{твэл}$ без дистанционирующих элементов и др., получаем:

$$\Pi = 2\pi\left(R_{ТК\,внутр} + n_{твэл} \cdot R_{твэл\,внеш}\right). \tag{4.29}$$

Локальные значения критериев подобия, расчёт критерия Нуссельта на участках ТК

В отечественной практике теплогидравлических расчётов для цилиндрических и плоских поверхностей используется следующее соотношение (упругие и капельные жидкости):

$$Nu_i = 0{,}021\,\mathrm{Re}_i^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}_i^{0.43} \text{ (турбулентный поток)}, \tag{4.30}$$

где Re_i и Pr_i – критерии Рейнольдса и Прандтля, соответственно. При этом необходимо, чтобы значения последних критериев лежали в пределах

$$\begin{aligned} &2 \cdot 10^3 < \mathrm{Re} < 6 \cdot 10^4; \\ &0{,}6 < \mathrm{Pr} < 2{,}5 \cdot 10^3. \end{aligned} \tag{4.31}$$

При проектировании следует избегать таких параметров, при которых значение критерия Рейнольдса лежит в пределах $1500 < R_e < 3000$ (критическая область с малой стабильностью потока ТН и возможными флуктуациями температуры). В каналах А3 и других элементах ядерных энергетических установок для достижения высокой интенсивности теплоотдачи обычно осуществляется турбулентное течение ТН. Турбулизация течения наступает в интервале $4 \cdot 10^3 < \mathrm{Re} < 6 \cdot 10^3$.

Значения Re_i и Pr_i определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Re}_i = v_i d_{эi} \gamma_i / \mu_i = v_i d_{эi} / \nu_i, \\ &\mathrm{Pr}_i = \nu_i / a_i, \end{aligned} \tag{4.32}$$

где μ_i – динамическая; ν_i – кинематическая вязкость; a_i – коэффициент температуропроводности ТН, являющиеся функциями температуры.

По определению $a_i = \frac{\lambda_i}{C_{pi}} \cdot \gamma_i$.

Функции $\mu = \mu(t), \nu = \nu(t), \lambda = \lambda(t), C_p = C_p(t), \gamma = \gamma(t)$ табулированы.

Для неметаллических жидкостей, текущих параллельно пучкам труб (случай, подобный течению ТН в ТК) или стержней при отношении шага в пучке к диаметру до 1,3, использование уравнения (4.30) обеспечивает удовлетворительную точность. Однако с увеличением зазора значение Nu растёт и уже при отношении 1,46 оно на 40 % выше, чем следует из (4.30). Для воды, при $d_э$ от I до 5 см, в этом случае следует использовать соотношение

$$Nu_i = 0{,}073(d_э)^{0,6} \cdot \mathrm{Re}^{0,6} \cdot \mathrm{Pr}^{0,3}. \qquad (4.33)$$

При вынужденном течении жидкометаллических теплоносителей используются следующее соотношение:

$$Nu_i = 7 + 0{,}025 \cdot \mathrm{Pe}^{0,8}, \qquad (4.34)$$

где $Pe_i = \mathrm{Pr}_i \cdot \mathrm{Re}_i$ – критерий Пекле.

В случае, если $50 < Pe < 2 \cdot 10^4$:

$$Nu_i = 0{,}625 \cdot Pe^{0,4}.$$

Коэффициент теплоотдачи на *i*-м участке определяется как произведение:

$$\alpha_i = \alpha_i^{\circ} \cdot \varepsilon_{zi} \cdot \varepsilon_{qi}, \qquad (4.35)$$

где α_i^0 – коэффициент теплоотдачи при стабилизированном (в тепловом и гидравлическом отношении) потоке (4.27); ε_{zi} – коэффициент, учитывающий влияние гидравлической стабилизации:

$$\varepsilon_{zi} = \begin{cases} 1{,}57 & при \quad z_c / d_{эi} \le 0{,}05; \\ 0{,}86 + 0{,}54(d_{эi} / z_c)^{0,4} & при \quad 0{,}5 \le z_c / d_{эi} \le 30; \\ 1 & при \quad z_c / d_{эi} > 30, \end{cases} \qquad (4.36)$$

где $z_c = z_i' - z_{M.C}$ – расстояние от данного участка до ближайшего местного сопротивления, расположенного выше по течению (вход в ТК, дистанционирующая решетка). Здесь $z_{M.C}$ и z_i' отсчитываются от входа в ТК, причём $z_i' > z_{M.C}$, ε_q – поправка на тепловую стабилизацию, которая вычисляется по соотношению:

$$\varepsilon_{qi} = q_{si} / \tilde{q}_i. \tag{4.37}$$

Здесь $\tilde{q}_i$ – решение уравнения:

$$3d_{эi} \frac{\partial \tilde{q}(z)}{\partial z} + \tilde{q}(z) = q_s(z) \tag{4.38}$$

в точке z, соответствующей координате i-го, участка, с граничным условием $\tilde{q}_i = 0$ на входе в ТК и на каждом местном сопротивлении.

Поскольку $q_S(z) = q_S^{\max} \cos\left(\pi \frac{z}{H_{а.з}}\right)$, то уравнение (4.38) принимает вид:

$$3d_{эi} \frac{\partial \tilde{q}(z)}{\partial z} + \tilde{q}(z) = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\pi \frac{z}{H_{а.з}}\right). \tag{4.39}$$

После представления уравнения (4.39) в конечно-разностной форме и проведения необходимых выкладок получаем:
для первого (i = 1) участка ТК

$$\tilde{q}_1 = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\pi \frac{z_1}{H_{а.з}}\right) / \left(\frac{6d_э}{\Delta z} + 1\right); \tag{4.40}$$

для i-го участка ТК, на котором имеется местное сопротивление

$$\tilde{q}_i = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\pi \frac{z_i}{H_{а.з}}\right) / \left(\frac{3d_э}{\Delta z^*} + 1\right), \tag{4.41}$$

где $\Delta z*$ – расстояние от местного сопротивления до середины данного участка ТК.

4.5. Расчёт распределения температуры в твэл

Температура поверхности твэл на участках

Температура поверхности твэл на *i-м* участке определяется соотношением

$$t_{повi} = t_i + q_{si} / \alpha_i. \tag{4.42}$$

В случае кипения недогретого водяного ТН на участке для определения превышения температуры поверхности твэл $t_{повi}$ относительно температуры насыщения t_S для давления, равного давлению в 1-м контуре, используются соотношения:

$$t_{повi} - t_s = \Delta t_0 \left[1 + \left(\frac{\Delta t_0 \alpha_i}{\Delta q_i}\right)^{3/2}\right]^{-2/3}, \tag{4.43}$$

где

$$\Delta t_0 = 0,51 \cdot \Delta q_i^{0,36} \cdot \exp\left(-8,65 \cdot 10^{-3} t_s\right); \tag{4.44}$$

$$\Delta q_i = q_{si} - \alpha_i \left(t_s - t_i\right). \tag{4.45}$$

В режиме равновесного кипения на участке $\Delta q_i = q_{Si}$:

$$t_{пов\,i} = t_s + \Delta t_0 \left[1 + \left(\frac{\Delta t_0 \alpha}{q_{si}}\right)^{3/2}\right]^{-2/3}. \tag{4.46}$$

Температура на поверхности топливной таблетки (ТТ)

Температура на поверхности ТТ определяется соотношением:

$$t_{TTi} = t_{пов\,i} + \Delta t_{1i} + \Delta t_{2i}, \tag{4.47}$$

где Δt_{1i} – перепад температуры на оболочке твэл; Δt_{2i} – на зазоре между оболочкой и ТТ.

Для цилиндрического твэл:

$$\Delta t_{1i} = \frac{q_{si}}{\lambda_{об}\left(t_{пов\,i}\right)} \cdot R_{твэл\,внеш} \cdot \ln \frac{R_{твэл\,внеш}}{R_{твэл\,внутр}}, \tag{4.48}$$

где $R_{твэл\ внут}$ – внутренний радиус оболочки твэл; $\lambda_{об}\left(t_{пов\,i}\right)$ – коэффициент теплопроводности материала оболочки при температуре $t_{пов\,i}$.

Температура на внутренней поверхности оболочки твэл определяется по соотношению:

$$t^*_{пов\,i} = t_{пов\,i} + \Delta t_1. \tag{4.49}$$

Перепад температуры на зазоре

$$\Delta t_{2i} = \frac{q_{si}}{\lambda_з\left(t_{пов\,i}\right)} \cdot R_{твэл\,внутр} \cdot \ln \frac{R_{твэл\,внутр} + \delta_з}{R_{твэл\,внутр}}, \tag{4.50}$$

где $\lambda_з\left(t_{пов\,i}\right)$ – коэффициент теплопроводности зазора (газ, жидкометаллическая прослойка) при температуре $t^*_{пов\,i}$; $\delta_з$ – толщина зазора.

Для плоского твэл или для случаев: $\delta_з << R_{твэл\ внут}$, $R_{твэл\ внеш} - R_{твэл\ внут} << R_{твэл\ внеш}$ значения перепадов температуры определяются соотношениями:

$$\Delta t_{1i} = \frac{q_{si}}{\lambda_{об}\left(t_{пов\,i}\right)} \cdot \delta_{об}; \tag{4.51}$$

$$\Delta t_{2i} = \frac{q_{si}}{\lambda_з\left(t^*_{пов}\right)} \cdot \delta_з, \tag{4.52}$$

где $\delta_{об}$ – толщина оболочки твэл.

Распределение температуры в ТТ

Для цилиндрической топливной таблетки, расположенной в твэле на *i*-м участке распределение температуры по радиусу описывается соотношением

$$t_i(r) = t_{TTi} + \frac{q_{Vi}}{4\lambda_{топ}\left(t_{TTi}\right)}\left(R_{TT}^2 - r^2\right), \tag{4.53}$$

где $\lambda_{топ}\left(t_{TTi}\right)$ – коэффициент теплопроводности топлива при температуре t_{TTi}; r – текущее значение координаты $0 \le r \le R_{TT}$.

Температура в центре ТТ, расположенной в твэле на *i*-м участке,

$$t_{ц\,i} = t_{TTi} + \frac{q_{Vi} \cdot R_{TT}^2}{4\lambda_{топ}\left(t_{TTi}\right)}. \tag{4.54}$$

Для оценки значения температуры в центре ТТ, расположенной в центре А3 (z = 0, r = 0), используется соотношение:

$$t_ц^{\max} = t_{TT}^{\max} + \frac{q_V^{\max} \cdot R_{TT}^2}{4\lambda_{топ}\left(t_{TT}^{\max}\right)}, \tag{4.55}$$

где максимальное значение температуры на поверхности ТТ $t_{TT}^{\max}$ определяется так же, как и t_{TTi} с заменой в соответствующих выражениях величины q_{si} на $q_S^{\max}$.

Соотношением (4.55) следует воспользоваться один раз для расчёта распределения температуры в ТТ, расположенной в центре А3:

$$t_ц^{\max} = t_{TT}^{\max} + \frac{q_V^{\max}}{4\lambda_{топ}\left(t_{TT}^{\max}\right)}\left(R_{TT}^2 - r^2\right). \tag{4.56}$$

Результаты расчётов необходимо представить в виде гистограмм, характеризующих изменение по ТК (от входа до выхода):

- скорости ТН,
- температуры ТН,
- коэффициента теплоотдачи,
- температуры на поверхности твэл,
- температуры на поверхности ТТ,
- температуры в центре ТТ.

Кроме того, необходимо графически представить распределение $t_ц^{\max}(r)$, где $0 \le r \le R_{твэл\ внеш}$.

4.6. Распределение температуры в блоке замедлителя

В случае, если функция замедлителя в реакторе выполняет графит, необходимо провести расчёты, позволяющие определить температурный режим эксплуатации блоков замедлителя.

Объёмная плотность тепловыделения в замедлителе

В графитовом замедлителе выделяется до 7 % тепловой мощности реактора. Максимально напряжённые условия эксплуатации соответствуют блокам замедлителя, находящимся в центре А3.

Используем следующее приближение:

- тепловыделение в замедлителе обусловлено только процессами замедления нейтронов и поглощения гамма-квантов;
- вся кинетическая энергия нейтронов превращается в тепловую за счёт упругих столкновений;
- тепловыделение за счёт упругого замедления нейтронов пропорционально плотности делений.

В этом приближении для блока замедлителя, размещённого в центре активной зоны, можно воспользоваться соотношением:

$$q^{ц}_{Vзам} = \frac{E_n}{E_f} \cdot k_V \frac{\Sigma_s \xi}{\overline{\Sigma_s \xi}} \cdot \frac{\overline{N}}{V_{а.з}} \cdot \Delta , \qquad (4.57)$$

где E_n= 5 МэВ – энергия нейтронов деления; E_f = 200 МэВ – энергия деления; $\Sigma_S \xi$ – замедляющая способность графита; $\overline{\Sigma_S \xi}$ – средняя замедляющая способность материала А3 (гомогенизированная А3); $V_{а.з}$ – объём А3. Значение $\overline{\Sigma_S \xi}$ определяется в ходе нейтронно-физического расчёта реактора, а замедляющая способность чистого графита составляет 0,0613 см$^{-1}$. Величина $\Delta = 4 \div 6$ характеризует отношение: q_v(за счёт гамма-квантов)/q_v(за счёт нейтронов).

Для расчёта $\overline{\Sigma_S \xi}$ используется соотношение

$$\overline{\Sigma_s \xi} = \frac{1}{S_{яч}} \sum_j (\Sigma_s \xi)_j \cdot S_j , \qquad (4.58)$$

где $S_{яч}$ – площадь поперечного сечения ячейки А3; S_i – площадь поперечного сечения ячейки, занятая соответствующим конструкционным материалом (топливо, сталь, теплоноситель, замедлитель); $(\xi\Sigma_S)_j$ – замедляющая способность *j*-го материала.

Если материал составляют несколько элементов, например сталь, то для определения значения $\Sigma_S \xi$ используется соотношение

$$\Sigma_s \xi = \sum_m \xi_m \cdot N_m \cdot \sigma_{sm} , \qquad (4.59)$$

где ξ_m – средняя логарифмическая потеря энергии нейтрона при упругом рассеянии на элементе *m*; N_m – ядерная концентрация данного элемента; σ_{Sm} – микросечение рассеяния нейтрона на элементе *m*.

Расчёт распределения температуры в центральном блоке замедлителя

При проведении предварительных расчётов можно допустить, что температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы ТК равны. Температуру на внутренней поверхности трубы технологического канала можно приблизительно определить по соотношению

$$t^{ц}_{ТК\,внутр} = t_i + \frac{q^*_s}{\alpha_i}, \tag{4.60}$$

где t_i – температура теплоносителя на участке с индексом «*I*»; α_i – коэффициент теплоотдачи на этом же участке; q^*_S – поверхностная плотность теплового потока из графита в теплоноситель:

$$q^*_s = q^{ц}_{Vзам} \cdot R_{ТК\,внеш} / 2, \tag{4.61}$$

где $R_{ТК\ внеш}$ – внешний радиус трубы ТК.

Температура на внутренней поверхности блока замедлителя определяется соотношением

$$t^{ц}_{зам.внутр} = t^{ц}_{ТК\,внеш} + \frac{\delta^{ТК}_з}{\lambda_з} \cdot q^*_s, \tag{4.62}$$

где $t^{ц}_{ТК\,внеш} = t^{ц}_{ТК\,внут}$; $\delta^{ТК}_3$ – толщина зазора между трубой *ТК* и внутренней поверхностью блока замедлителя; λ_3 – коэффициент теплопроводности газовой смеси, прокачиваемой через зазор (азот, температура 20 °С).

Распределение температуры в центральном блоке замедлителя описывается выражением

$$t(r) = t^{ц}_{зам.внутр} + \frac{q^{ц}_{Vзам} \cdot R^2_э}{2\overline{\lambda}} \cdot \left[\ln\frac{r}{R_{ТК\,внеш}} - \frac{r^2 - R^2_{ТК\,внеш}}{2R^2_э} \right], \tag{4.63}$$

где $R_{ТК\,внеш} \le r \le R_э$; $\overline{\lambda}$ – среднее значение коэффициента теплопроводности графита (15÷20 Вт/м·К); $R_э$ – эквивалентный радиус блока замедлителя.

Для блока замедлителя, представляющего собой в поперечном сечении многоугольник, $R_э$ определяется соотношением

$$R_Э = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \tag{4.64}$$

где S – площадь поперечного сечения блока. Для квадратного сечения со стороны квадрата a:

$$R_{Э} = \frac{a}{\sqrt{\pi}}. \tag{4.65}$$

Результаты расчётов необходимо представить в виде графика распределения $t(r)$, где $R_{ТК\,внут} \le r \le R_{э}$.

4.7. Распределение температуры в органах регулирования

Обычно, в качестве материалов для изготовления органов регулирования реактором используются борсодержащие материалы: бористая сталь, карбид бора. Тепловыделение в таких материалах в основном (60 % от общего тепловыделения) обусловлено протеканием реакции

$$_0n^1 + B^{10} = {}_3Li^7 + {}_2\alpha^4 + \gamma, \tag{4.66}$$

которая происходит на тепловых и промежуточных (в меньшей степени) нейтронах.

Объёмная плотность тепловыделения в поглощающем стержне

В первом приближении объёмную плотность тепловыделения в поглощающем стержне радиусом R_c можно считать равномерной по координате r: $0 \le r \le R_{\text{ст}}$ и зависящей от координат z и R. Здесь R – координата, отсчитываемая от оси А3 в направлении её периферии: $0 \le r \le R_{а.з}$.

Среднее по А3 значение плотности потока тепловых нейтронов определяется соотношением

$$\overline{\Phi} = \frac{\overline{N}}{\Sigma_f E_f V_{топ}}, \tag{4.67}$$

где Σ_f – макроскопическое сечение деления топлива; $E_f \cong 181$ МэВ = $= 2{,}9 \cdot 10^{-11}$ Вт·с – энергия деления одного ядра, которая превращается в тепловую; $V_{топ}$ – объём топлива в А3:

$$V_{топ} = \pi R_{ТТ}^2 \cdot n_{ТК} \cdot n_{твэл} \cdot H_{а.з}. \tag{4.68}$$

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по объёму А3 в идеальном случае описывается выражением

$$\Phi(r,z) = \overline{\Phi} \cdot k_V \cdot J_0\left(2{,}405\frac{r}{R_{а.з}}\right) \cdot \cos\left(\pi\frac{z}{H_{а.з}}\right), \tag{4.69}$$

где $0 \le r \le R_{а.з}$, $\quad -\frac{H_{а.з}}{2} \le z \le \frac{H_{а.з}}{2}$.

Количество реакций (n, α) в единицу времени в единице объёма поглощающего стержня пропорционально F и $\Sigma_{n,\alpha}$, где $\Sigma_{n,\alpha}$ – макроскопическое сечение реакции (n, α) для материала, из которого выполнен стержень:

$$\Sigma_{n,\alpha} = \sigma_{n,\alpha} \cdot N_{B^{10}}, \tag{4.70}$$

где $\sigma_{n,\alpha}$ – микросечение реакции (n, α) при взаимодействии теплового нейтрона с ядром B^{10}; $N_{B^{10}}$ – ядерная концентрация B^{10} в материале, из которого выполнен стержень. В реакции $B^{10}(n,\alpha)Li^{7}$ освобождается 2,79 МэВ, из которых 2,31 МэВ выделяется в непосредственной близости от точки протекания реакции:

$$\Delta E \cong 2{,}31 \text{ МэВ} = 3{,}696 \cdot 10^{-13} \text{ Вт·с}.$$

Таким образом, объёмная плотность энерговыделения в материале стержня определяется соотношением

$$q_{Vcm}(z) = \Delta E \cdot \Phi(R^*, z) \cdot \Sigma_{n,\alpha} \cdot 1{,}33, \tag{4.71}$$

где R^* – расстояние от оси А3 до оси стержня; z – координата того участка стержня, для которого определяется температурный режим эксплуатации.

Максимально жёсткие температурные режимы соответствуют участкам стержней, находящимся в области максимума плотности потока тепловых нейтронов. В идеальном случае максимум Φ приходится на координату z = 0. В этом случае

$$q_{Vcm}^{\max}(R^*) = \Delta E \cdot \Phi(R^*, 0) \cdot \Sigma_{n,\alpha} \cdot 1{,}33. \tag{4.72}$$

Расчёт распределения температуры на наиболее энергонапряжённом участке поглощающего стержня

Температуру поверхности стержня можно определить по соотношению

$$t_{cm}^{n} = \overline{t_{TH}} + \frac{q_{Vcm}^{\max} \cdot R_{cm}}{2\overline{\alpha}}, \tag{4.73}$$

где $\overline{t_{TH}} = \frac{t_{вх} + t_{вых}}{2}$; $\overline{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{I} \alpha_i}{I}$; R_{cm} – радиус поглощающего стержня.

Распределение температуры по радиусу стержня, расположенного на расстоянии R^* от оси А3, описывается соотношением

$$t_{cm}(r) = t_{cm}^{n} + \frac{q_{Vcm}^{\max}}{4\lambda_{cm}(t_{cm}^{n})} \cdot (R_{cm}^2 - r^2), \tag{4.74}$$

где $0 \le r \le R_{cm}$; $\lambda_{cm}\left(t_{cm}^{n}\right)$ – коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнен стержень при температуре t_{cm}^{n}.

Температура в центре стержня вычисляется по формуле

$$t_{cm}^{ц} = t_{cm}^{n} + \frac{q_{Vcm}^{\max} \cdot R_{cm}^{2}}{4\lambda_{\ cm}\left(t_{cm}^{n}\right)}. \tag{4.75}$$

Результаты расчётов необходимо представить в виде таблицы по схеме: номер группы стержней – удаление от оси А3 – температура в центре стержня.

Кроме этого, необходимо графически представить распределение, $t_{cm}(r)$, где $0 \le r \le R_{cm}$ для стержня из 1-й группы, расположенной ближе других к оси А3.

4.8. Гидравлический расчёт ТК

Для прокачки ТН через ТК реактора с необходимой скоростью следует создать соответствующий перепад давления.

Для расчета гидравлического сопротивления ТК обычно используется выражение

$$\Delta p_{TK} = \sum_{i} \Delta p_{Ti} + \sum_{j} \Delta p_{Mj}, \tag{4.76}$$

где ΔP_{Ti} – сопротивление трения на *i*-м участке канала; ΔP_{Mj} – местное сопротивление (входные и выходные устройства, сужения, дистанционирующие решетки, изгибы и т. д.).

Сопротивление трения на *i*-м участке

$$\Delta p_{Ti} = \frac{\xi_i \cdot \Delta z_i}{d_{эi}} \cdot \left(\frac{\gamma_i \cdot v_i^2}{2}\right), \tag{4.77}$$

где ξ_i – коэффициент трения на *i*-м участке; Δz_i и $d_{эi}$ – длина и эквивалентный диаметр *i*-го участка ТК; γ_i и v_i – плотность и скорость ТН на *i*-м участке.

В случае стабилизированного турбулентного течения коэффициент трения для гладких круглых труб хорошо определяется соотношением

$$\xi_{тр} = \frac{1}{\left(1{,}82 \cdot \lg\left(\mathrm{Re}_i\right) - 1{,}64\right)^2}. \tag{4.78}$$

Для расчёта коэффициентов трения в пучках твэл можно использовать следующие формулы:
для треугольной решетки твэл

$$\frac{\xi_i}{\xi_{тр}} = 0{,}57 + 0{,}18(x-1) + 0{,}53\left[1 - \exp(-a)\right], \tag{4.79}$$

где

$$a = \begin{cases} 0,58\left\{1-\exp\left[-70\left(x-1\right)\right]\right\}+9,2\left(x-1\right) & при\ \ x<1,02, \\ 0,58+9,2\left(x-1\right) & при\ \ x>1,02; \end{cases} \qquad (4.80)$$

для квадратной решетки твэл

$$\frac{\xi_i}{\xi_{mp}} = 0,59+0,19(x-1)+0,52\left\{1-\exp\left[-10\left(x-1\right)\right]\right\}. \qquad (4.81)$$

Здесь приняты следующие обозначения: ξ_{mp} – коэффициент трения для круглой трубы при том же значении Re (4/32); x – отношение расстояния между центрами соседних твэл к диаметру твэл.

Для расчёта местных сопротивлений используется выражение (4.78), в котором вместо коэффициента трения ξ_{mp} используются коэффициенты местных сопротивлений. Для определения последних используются расчётные соотношения и графические зависимости, приводимые в справочной литературе [16,17]. При этом необходимо привести эскиз элементов конструкции, представляющих собой местные сопротивления.

После вычисления значений ΔP_{Ti} и ΔP_{Mj} строится эпюра перепада давлений по ТК.

Мощность, необходимая для прокачки ТН через А3 реактора, рассчитывается по формуле

$$N_{TH} = n_{TK} \cdot \frac{G\Delta P_{TK}}{\eta \cdot \bar{\gamma}}, \qquad (4.82)$$

где $\bar{\gamma}$ – среднее значение плотности ТН в ТК; η – кпд насосов или компрессоров.

4.9. Оценка критических тепловых потоков

В реакторах, охлаждаемых водой или органическими жидкостями, с целью обеспечения надёжной эксплуатации твэлов производится расчёт критических тепловых потоков $q_{si}^{крит}$ на участках ТК, которые сравниваются со значениями q_{si}. Если на *i*-м участке $q_{si}^{крит} > q_{si}$, то кризис теплоотдачи на данном участке отсутствует (необходимо построить эпюры $q_{si}^{крит}$ и q_{si}). Если на каком-либо участке последнее условие не выполняется, то это свидетельствует о возможности кризиса теплоотдачи. В этом случае все расчёты необходимо повторить. При этом, соответственно, придётся пересмотреть ряд геометрических и эксплуатационных параметров реактора.

Критическую тепловую нагрузку в случае водяного ТН, смывающего сборку стержневых цилиндрических твэлов, при давлении в I-м

контуре 14÷20 МПа, недогреве до кипения Δt_s=10÷100 °С и скорости ТН v= 1,5÷7 м/с:

$$q_{si}^{крит} = 41300 \cdot (v_i \gamma_i)^{0,5} \Delta t_H^{0,33} \cdot \left(\frac{V'}{V'' - V'} \right), \ \frac{Вт}{м^2}, \tag{4.83}$$

где $\Delta t_н = t_s - t_{вых}$; t_s – температура кипящей воды при заданном давлении (температура насыщения); V'' и V' – удельные объёмы пара и воды при t_s.

4.10. Оценка напряжённого состояния элементов конструкции ТК

Термические напряжения в трубчатой оболочке твэла

Для расчёта величины термических напряжений в оболочке твэл используется выражение

$$\sigma_{обi} = \frac{E \alpha \Delta t_{1i}}{2(1-\nu)} \cdot \left(1 + \frac{m}{6+3m} \right), \tag{4.84}$$

где α – коэффициент линейного теплового расширения; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона (величины, зависящие от типа материала оболочки); Δt_{1i} – перепад температуры на оболочке твэл на i-м участке ТК;

$$m = 1 - \frac{R_{твэл\,внутр}}{R_{твэл\,внешн}}. \tag{4.85}$$

Если толщина оболочки мала, то $\left(1 + \frac{m}{6+3m} \right) \to 1$ и

$$\sigma_{обi} \approx \frac{E \alpha \Delta t_{1i}}{2(1-\nu)}. \tag{4.86}$$

Полученные значения $\sigma_{обi}$ необходимо сравнить с пределом прочности материала оболочки твэла $\sigma_{пр}$. Необходимо, чтобы $\sigma_{обi} < \sigma_{пр}$. В противном случае требуется провести расчёт вновь после пересмотра ряда геометрических и эксплуатационных параметров реактора.

Термические напряжения в твёрдом замедлителе

Для оценки максимального значения растягивающего напряжения в объёме блока замедлителя нужно воспользоваться соотношением

$$\sigma_{зам}^{\max} = \frac{q_s^*}{\lambda} \cdot \frac{\alpha E}{1-\nu} \cdot f_2, \tag{4.87}$$

где λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент линейного теплового расширения; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона для графита. Функция f_2 сведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Зависимость функции f_2 от параметров блока замедлителя

$\frac{R_{ТК\ внутр}}{R_э}$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
f_2	$138\cdot10^{-5}$	$285\cdot10^{-5}$	$46\cdot10^{-4}$	$655\cdot10^{-5}$	$885\cdot10^{-5}$	$1155\cdot10^{-5}$	$145\cdot10^{-4}$

Значение $\sigma_{зам}^{\max}$ также следует сравнить с пределом прочности графита на растяжение $\sigma_{пр}^{c}$ с целью проверки выполнения условия $\sigma_{зам}^{\max} < \sigma_{пр}^{c}$.

Расчёт термических напряжений в ТТ

В стационарном режиме в предположении постоянства объёмной плотности тепловыделения в цилиндрической ТТ нормальные компоненты термомеханического напряжения определяются соотношениями:

$$\sigma_{rr}(r)_i = \frac{\alpha E q_{vi}}{16\lambda_{mon}(1-\nu)}(r^2 - R_{TT}^2); \tag{4.88}$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r)_i = \frac{\alpha E q_{vi}}{16\lambda_{mon}(1-\nu)}(3r^2 - R_{TT}^2); \tag{4.89}$$

$$\sigma_{zz}(r)_i = \frac{\alpha E q_{vi}}{16\lambda_{mon}(1-\nu)}(4r^2 - 2R_{TT}^2), \tag{4.90}$$

где текущее значение координаты $0 \le r \le R_{TT}$; коэффициент теплопроводности топлива λ_{mon} берётся для среднего (между центром и поверхностью ТТ) значения температуры; α, E, n – коэффициенты для материала топлива.

Используя соотношения (4.88)–(4.90), следует рассчитать распределения $\sigma_{rr}(r)$, $\sigma_{\theta\theta}(r)$ и $\sigma_{zz}(r)$ на наиболее энергонапряженном участке ТК, т. е. при $q_{Vi} = q_V^{\max}$. Затем необходимо сравнить максимальные значения компонент $\sigma_{rr}(r)$, $\sigma_{\theta\theta}(r)$ и $\sigma_{zz}(r)$ с пределом прочности материала ТТ. При верном выборе геометрических и конструктивных параметров реактора ни одна из компонент не должна превышать соответствующие пределы прочности.

4.11. Использование вычислительной техники при выполнении курсового проекта

В ходе выполнения курсового проекта студентами, обучающимися по специальностям 070500 «Ядерные реакторы и энергетические установки», используются следующие программы и пакеты прикладных программ:

OPT – при оптимизационных нейтронно-физических расчётах ячейки реактора;

DET1 – при двухгрупповом нейтронно-физическом расчёте;

DET2. – при нейтронно-физическом расчёте реактора со стержнями управления;

TGR – при теплогидравлических расчётах;
TVEL – при оптимизационных теплофизических расчётах тепловыделяющих элементов;
PROGEKT – при двухгрупповом нейтронно-физическом расчёте реактора без и с центральным стержнем управления;
RAZ – при физическом расчёте защиты реактора.

Они реализованы на PC: операционная система WINDOWS NT; языки программирования – Q BASIC, FORTRAN.

Оптимизация ячейки

Для выбора оптимальной решетки реактора необходимо выполнить расчеты ряда вариантов ячейки, различающихся, прежде всего величинами диаметра твэл и шага решетки.

По конструкции ячейки и набору используемых материалов можно выделить три основных типа реакторов:

1. Уран-графитовый реактор – канальный реактор с внешним охлаждением твэл. Теплоноситель – вода, жидкий металл. Ячейка – 4- или 6-гранная (рис. 4.1–4.2).
2. Газо-графитовый реактор – канальный реактор с внешним охлаждением твэл. Теплоноситель газ (CO_2, He). Ячейка – 4- или 6-гранная (рис. 4.3–4.4).
3. Водо-водяной реактор – корпусный реактор с внешним охлаждением твэл. Теплоноситель – вода. Ячейка – 6-гранная (рис. 4.5–4.6).

Основной целью оптимизации является нахождение такой геометрии ячейки, при которой при заданном материальном составе активной зоны коэффициент размножения k_∞ был бы максимальным. Рассмотрим организацию расчета для различных типов реакторов.

Уран-графитовый реактор

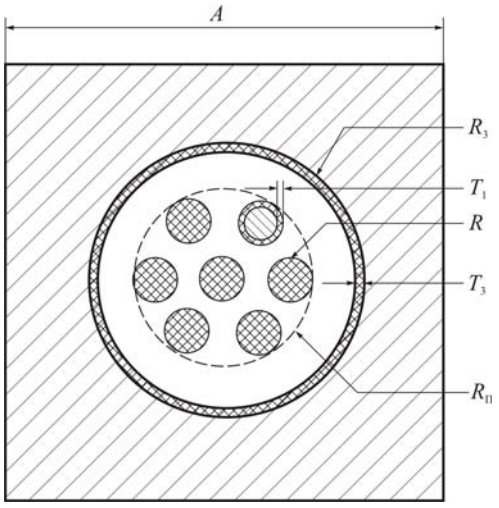


Рис. 4.1. Квадратная ячейка уран-графитового ядерного реактора

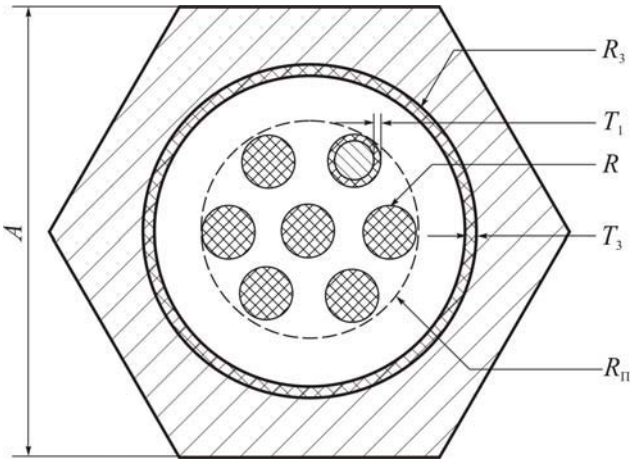


Рис. 4.2. Шестигранная ячейка уран-графитового реактора
A – шаг решетки, см; R – радиус твэл, см;
R_3 – внешний радиус ТТК, см; $R_П$ – радиус пучка, см;
T_1 – толщина оболочки твэл, см; T_3 – толщина ТТК, см

Ввод исходных данных для расчета

Для выполнения расчета необходимо выполнить ввод начальных данных. После загрузки программы оптимизации, в меню **Файл** выбирайте **Создать файл** данных и затем **Уран-графитовый реактор с внешним охлаждением** (см. рис. 4.1).

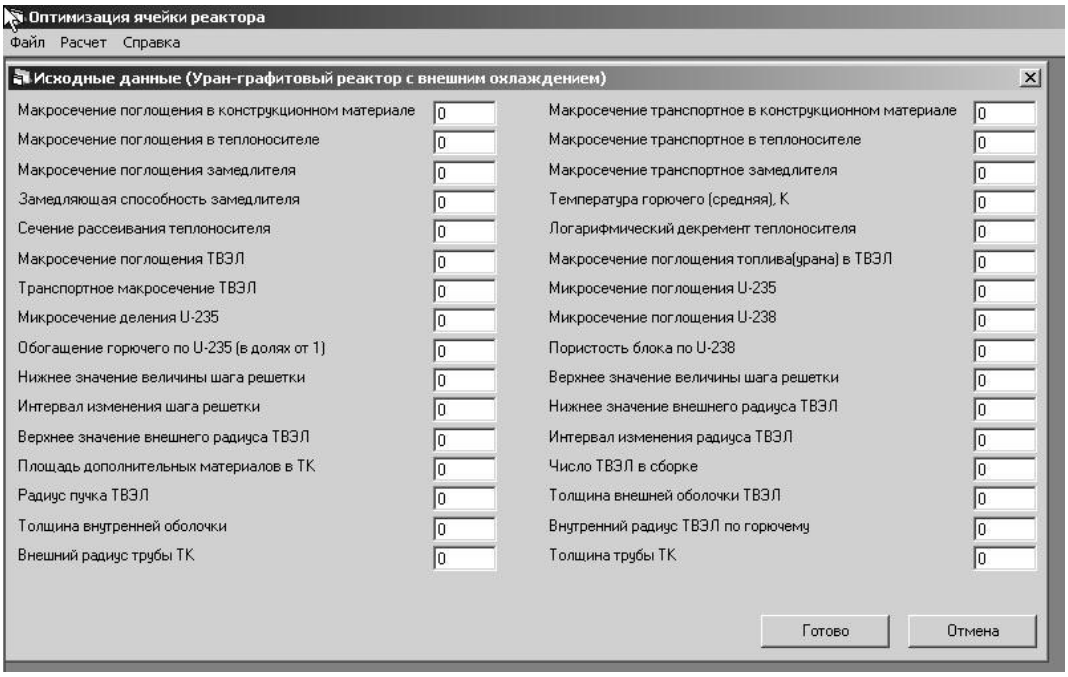


Рис. 4.3. Окно ввода начальных данных

Макросечение поглощения в конструкционном материале (например, сталь IX18H9T), теплоносителе (например, CO_2), замедлителе (на-

пример, графит) – расчет необходимо производить с использованием следующего выражения:

$$\Sigma_a^{\text{КМ, ТН, З}} = \sum_i \sigma_a^i \cdot N^i \cdot \delta^i \text{ , см}^{-1},$$

где σ_a^i – микроскопическое сечение поглощения элемента, N – концентрация, δ – доля элемента в конструкционном материале, теплоносителе, замедлителе, суммирование ведется по всем элементам, i – текущий элемент. Значение в соответствующем поле указывается в см^{-1}.

Макросечение транспортное в конструкционном материале, теплоносителе, замедлителе:

$$\Sigma_{tr}^{\text{КМ, ТН, З}} = \sum_i \left[\sigma_a^i + \sigma_s^i \left(1 - \mu_s^i\right) \right] \cdot N^i \cdot \delta^i \text{ , см}^{-1},$$

где σ_s^i – микроскопическое сечение рассеяния элемента. Значение в соответствующем поле указывается в см^{-1}.

Замедляющая способность замедлителя:

$$\xi\Sigma_S \text{, см}^{-1}.$$

Температура горючего (средняя) – так как расчет в данной части ведется для холодного реактора, то температуру необходимо принять 293 К.

Сечение рассеивания теплоносителя – указывается макроскопическое сечение, см^{-1}.

Макросечение поглощения, транспортное макросечение твэл – расчет ведется для всего твэл (например, UO_2, $U_{\text{ме}}$), значение указывается в см^{-1}.

Макросечение поглощения топлива – указывается макроскопическое сечение для U^{235}, см^{-1}.

Обогащение горючего по U^{235} – указывается обогащение горючего в долях от 1.

Пористость блока по U^{238} – пористость блока, определяемая по формуле $\varepsilon = \dfrac{\left(1 - C_{\text{U}^{235}}\right) \cdot \rho_{\text{U}^{238}_{\text{теор}}} \cdot N_A \Big/ A_{\text{U}^{238}}}{\left(1 - C_{\text{U}^{235}}\right) \cdot \rho_{\text{топл}} \cdot N_A \Big/ A_{\text{топл}}}$, где в качестве топлива выступает UO_2, $U_{\text{ме}}$, UC и др.

Нижнее значение величины шага решетки – например, 24 см.

Верхнее значение величины шага решетки – например, 36 см.

Интервал изменения шага решетки – следует указывать 1–2 см.

Нижнее значение внешнего радиуса твэл – например, 0,4 см.

Верхнее значение внешнего радиуса твэл – например 0,9 см.

Интервал изменения радиуса твэл – например, 0,1 см.

Площадь дополнительных материалов в ТК – здесь необходимо указать 0.

Число твэл в сборке – необходимо указать количество твэл в ТВС.

Радиус пучка твэл – для вычисления радиуса пучка, смотрите рисунок своей ячейки настоящего методического пособия.

Пример расчета

1. Исходные данные

Макросечение поглощения в конструкционном материале..... 0.26 $см^{-1}$
Макросечение транспортное в конструкционном материале ..... 0.89 $см^{-1}$
Макросечение поглощения в теплоносителе ..... 0.0221 $см^{-1}$
Макросечение транспортное в теплоносителе ..... 2.31 $см^{-1}$
Макросечение поглощения замедлителя..... 0.00023 $см^{-1}$
Макросечение транспортное замедлителя ..... 0.366 $см^{-1}$
Замедляющая способность замедлителя ..... 0.061 $см^{-1}$
Температура горючего (средняя) ..... 293 К
Сечение рассеивания теплоносителя ..... 2.67 $см^{-1}$
Логарифмический декремент теплоносителя 0.107
Макросечение поглощения твэл..... 0.294 $см^{-1}$
Макросечение поглощения топлива ..... 0.248 $см^{-1}$
Транспортное макросечение твэл ..... 0.666 $см^{-1}$
Микросечение поглощения U^{235} ..... 496 барн
Микросечение деления U^{235} ..... 423 барн
Микросечение поглощения U^{238} ..... 2.71 барн
Обогащение горючего по U^{235} 0.022
Пористость блока по U^{238} 0.699
Нижнее значение величины шага решетки ..... 20 см
Верхнее значение величины шага решетки ..... 40 см
Интервал изменения шага решетки ..... 2 см
Нижнее значение внешнего радиуса твэл ..... 0.4 см
Верхнее значение внешнего радиуса твэл..... 0.8 см
Интервал изменения радиуса твэл ..... 0.1 см
Площадь дополнительных материалов в ТК ..... 0 $см^2$
Число твэл в сборке 18
Радиус пучка твэл ..... 3.81 см
Толщина внешней оболочки твэл ..... 0.095 см
Толщина внутренней оболочки..... 0 см
Внутренний радиус твэл по горючему ..... 0 см
Внешний радиус трубы ТК..... 4.4 см
Толщина трубы ТК ..... 0.45 см

2. Таблица выходных данных

Число вторичных нейтронов на один акт деления – 1,6948 (η)

$R_{твэл}$ ε φ θ_0 $\theta_ф$ θ k_∞ F $S_{топл}$ $S_{т/н}$ $S_{км}$

Шаг решетки: 20.00

0.4	1.0093	0.8726	0.2893	0.9764	0.2825	0.4217	2.0922	9.0478	35.1608	16.6126
0.5	1.0146	0.8216	0.3731	0.9794	0.3654	0.5163	2.1679	14.1372	28.997	17.687
0.6	1.021	0.7599	0.4451	0.982	0.4371	0.5748	2.2136	20.3575	21.7023	18.7614
0.7	1.0286	0.6852	0.5054	0.9845	0.4975	0.5943	2.2098	27.7088	13.2765	19.8358
0.8	1.0374	0.5945	0.5554	0.9868	0.5481	0.5729	2.1309	36.1911	3.7198	20.9103

Шаг решетки: 22.00

0.4	1.0093	0.8898	0.2893	0.9691	0.2804	0.4268	2.0922	9.0478	35.1608	16.6126
0.5	1.0146	0.8462	0.3731	0.9727	0.363	0.5282	2.1679	14.1372	28.997	17.687
0.6	1.021	0.7941	0.4451	0.976	0.4344	0.5969	2.2136	20.3575	21.7023	18.7614
0.7	1.0286	0.7315	0.5054	0.979	0.4948	0.631	2.2098	27.7088	13.2765	19.8358
0.8	1.0374	0.6564	0.5554	0.9819	0.5454	0.6294	2.1309	36.1911	3.7198	20.9103

Шаг решетки: 24.00

0.4	1.0093	0.904	0.2893	0.961	0.278	0.4299	2.0922	9.0478	35.1608	16.6126
0.5	1.0146	0.8664	0.3731	0.9652	0.3602	0.5366	2.1679	14.1372	28.997	17.687
0.6	1.021	0.8218	0.4451	0.9692	0.4314	0.6135	2.2136	20.3575	21.7023	18.7614
0.7	1.0286	0.7689	0.5054	0.9728	0.4917	0.659	2.2098	27.7088	13.2765	19.8358
0.8	1.0374	0.7059	0.5554	0.9763	0.5423	0.673	2.1309	36.1911	3.7198	20.9103

Шаг решетки: 26.00

0.4	1.0093	0.9157	0.2893	0.9519	0.2754	0.4314	2.0922	9.0478	35.1608	16.6126
0.5	1.0146	0.8831	0.3731	0.9569	0.3571	0.5423	2.1679	14.1372	28.997	17.687
0.6	1.021	0.8446	0.4451	0.9616	0.428	0.6256	2.2136	20.3575	21.7023	18.7614
0.7	1.0286	0.7993	0.5054	0.9659	0.4881	0.6802	2.2098	27.7088	13.2765	19.8358
0.8	1.0374	0.7459	0.5554	0.9699	0.5387	0.7065	2.1309	36.1911	3.7198	20.9103

Здесь:

η – коэффициент размножения на тепловых нейтронах в топливе;

ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

φ – вероятность избежать резонансного захвата;

θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фикт. блока;

$\theta_ф$ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фикт. блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов;

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;

k_∞ – коэффициент размножения для бесконечной среды;

F – коэффициент экранировки (F);

$S_{топл}$ – площадь, занимаемая топливом;

$S_{тн}$ – площадь, занимаемая теплоносителем;

$S_{км}$ – площадь, занимаемая конструкционными материалами.

Газо-графитовый реактор

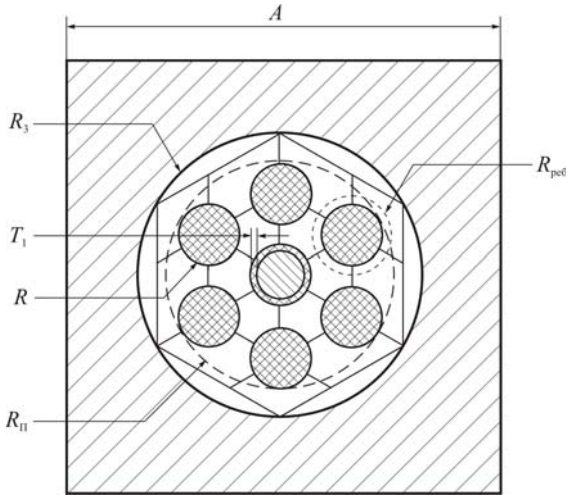


Рис. 4.4. Квадратная ячейка газо-графитового реактора

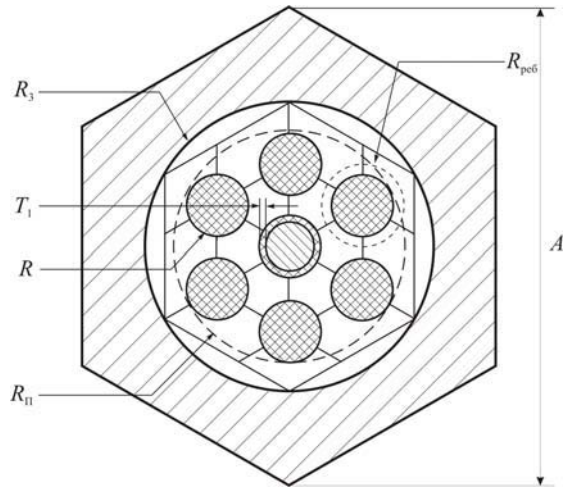


Рис. 4.5. Шестигранная ячейка газо-графитового реактора
A – шаг решетки, см; R – радиус твэл, см; R_3 – радиус ТК, см;
$R_П$ – радиус пучка, см; T_1 – толщина оболочки твэл, см;
$R_{реб}$ – размах ребер, см

Пример расчета

1. Исходные данные

Макросечение поглощения в конструкционном материале	0.2 $см^{-1}$
Макросечение транспортное в конструкционном материале	1.148 $см^{-1}$
Макросечение поглощения в теплоносителе	0 $см^{-1}$
Макросечение транспортное в теплоносителе	0.016 $см^{-1}$
Макросечение поглощения замедлителя	0.0003 $см^{-1}$
Макросечение транспортное замедлителя	0.495 $см^{-1}$
Замедляющая способность замедлителя	0.083 $см^{-1}$

Температура горючего (средняя)	293 К
Сечение рассеивания теплоносителя	0.016 $см^{-1}$
Логарифмический декремент теплоносителя	0.135
Макросечение поглощения твэл	0.249 $см^{-1}$
Макросечение поглощения топлива	0.196 $см^{-1}$
Транспортное макросечение твэл	0.713 $см^{-1}$
Микросечение поглощения U^{235}	535.575 барн
Микросечение деления U^{235}	456.376 барн
Микросечение поглощения U^{238}	2.192 барн
Обогащение горючего по U^{235}	0.015
Пористость блока по U^{238}	0.509
Нижнее значение величины шага решетки	16 см
Верхнее значение величины шага решетки	40 см
Интервал изменения шага решетки	4 см
Нижнее значение внешнего радиуса твэл	0.5 см
Верхнее значение внешнего радиуса твэл	1.2 см
Интервал изменения радиуса твэл	0.1 см
Площадь дополнительных материалов в ТК	0 $см^2$
Число твэл в сборке	7
Радиус пучка твэл	4.8 см
Толщина внешней оболочки твэл	0.025 см
Толщина внутренней оболочки	0 см
Внутренний радиус твэл по горючему	0 см
Внешний радиус трубы ТК	4.8 см
Толщина трубы ТК	0.45 см

2. Таблица выходных данных

Число вторичных нейтронов на один акт деления – 1.6589 (η)

$R_{твэл}$	ε	φ	θ_0	$\theta_ф$	θ	k_∞	F	$S_{топл}$	$S_{т/н}$	$S_{км}$
Шаг решетки: 16.00										
0.5	1.0031	0.8399	0.2638	0.9871	0.2604	0.3639	1.1313	5.4978	53.3054	13.579
0.6	1.0045	0.8028	0.3295	0.9887	0.3258	0.4358	1.1631	7.9168	50.7765	13.689
0.7	1.0062	0.7648	0.388	0.9901	0.3842	0.4904	1.2037	10.7757	47.8076	13.7989
0.8	1.008	0.726	0.4388	0.9912	0.435	0.5281	1.2544	14.0743	44.399	13.9089
0.9	1.0102	0.6868	0.4823	0.9922	0.4785	0.5507	1.3164	17.8128	40.5506	14.0188
1	1.0126	0.6475	0.5192	0.993	0.5156	0.5607	1.3906	21.9911	36.2623	14.1288
1.1	1.0152	0.6083	0.5505	0.9936	0.547	0.5603	1.4778	26.6093	31.5342	14.2388
1.2	1.0181	0.5694	0.5771	0.9941	0.5737	0.5517	1.5784	31.6672	26.3663	14.3487

Шаг решетки: 20.00

0.5	1.0031	0.9066	0.2638	0.9707	0.2561	0.3863	1.1313	5.4978	53.3054	13.579
0.6	1.0045	0.8838	0.3295	0.9735	0.3208	0.4724	1.1631	7.9168	50.7765	13.689
0.7	1.0062	0.8601	0.388	0.9759	0.3787	0.5436	1.2037	10.7757	47.8076	13.7989
0.8	1.008	0.8353	0.4388	0.9779	0.4291	0.5994	1.2544	14.0743	44.399	13.9089
0.9	1.0102	0.8097	0.4823	0.9796	0.4724	0.641	1.3164	17.8128	40.5506	14.0188
1	1.0126	0.7834	0.5192	0.9809	0.5093	0.6702	1.3906	21.9911	36.2623	14.1288
1.1	1.0152	0.7564	0.5505	0.982	0.5406	0.6887	1.4778	26.6093	31.5342	14.2388
1.2	1.0181	0.729	0.5771	0.9829	0.5672	0.6984	1.5784	31.6672	26.3663	14.3487

$R_{твэл}$ ε φ θ_0 $\theta_ф$ θ k_∞ F $S_{топл}$ $S_{т/н}$ $S_к$

Шаг решетки: 24.00

0.5	1.0031	0.9381	0.2638	0.9492	0.2504	0.3909	1.1313	5.4978	53.3054	13.579
0.6	1.0045	0.9227	0.3295	0.9532	0.3141	0.483	1.1631	7.9168	50.7765	13.689
0.7	1.0062	0.9065	0.388	0.9568	0.3713	0.5617	1.2037	10.7757	47.8076	13.7989
0.8	1.008	0.8894	0.4388	0.9598	0.4212	0.6264	1.2544	14.0743	44.399	13.9089
0.9	1.0102	0.8716	0.4823	0.9623	0.4641	0.6778	1.3164	17.8128	40.5506	14.0188
1	1.0126	0.853	0.5192	0.9643	0.5007	0.7174	1.3906	21.9911	36.2623	14.1288
1.1	1.0152	0.8338	0.5505	0.9659	0.5318	0.7467	1.4778	26.6093	31.5342	14.2388
1.2	1.0181	0.814	0.5771	0.9672	0.5582	0.7674	1.5784	31.6672	26.3663	14.3487

Шаг решетки: 28.00

0.5	1.0031	0.9557	0.2638	0.9228	0.2434	0.3872	1.1313	5.4978	53.3054	13.579
0.6	1.0045	0.9446	0.3295	0.9283	0.3059	0.4815	1.1631	7.9168	50.7765	13.689
0.7	1.0062	0.9328	0.388	0.9331	0.3621	0.5637	1.2037	10.7757	47.8076	13.7989
0.8	1.008	0.9203	0.4388	0.9371	0.4112	0.6329	1.2544	14.0743	44.399	13.9089
0.9	1.0102	0.9072	0.4823	0.9404	0.4535	0.6895	1.3164	17.8128	40.5506	14.0188
1	1.0126	0.8935	0.5192	0.9431	0.4897	0.735	1.3906	21.9911	36.2623	14.1288
1.1	1.0152	0.8792	0.5505	0.9453	0.5204	0.7706	1.4778	26.6093	31.5342	14.2388
1.2	1.0181	0.8644	0.5771	0.9471	0.5466	0.7979	1.5784	31.6672	26.3663	14.3487

Шаг решетки: 32.00

0.5	1.0031	0.9667	0.2638	0.8922	0.2354	0.3786	1.1313	5.4978	53.3054	13.579
0.6	1.0045	0.9583	0.3295	0.8991	0.2963	0.4731	1.1631	7.9168	50.7765	13.689
0.7	1.0062	0.9493	0.388	0.9051	0.3512	0.5565	1.2037	10.7757	47.8076	13.7989
0.8	1.008	0.9398	0.4388	0.9102	0.3994	0.6277	1.2544	14.0743	44.399	13.9089
0.9	1.0102	0.9298	0.4823	0.9144	0.441	0.6871	1.3164	17.8128	40.5506	14.0188
1	1.0126	0.9192	0.5192	0.9178	0.4765	0.7358	1.3906	21.9911	36.2623	14.1288
1.1	1.0152	0.9082	0.5505	0.9206	0.5068	0.7752	1.4778	26.6093	31.5342	14.2388
1.2	1.0181	0.8967	0.5771	0.9228	0.5326	0.8066	1.5784	31.6672	26.3663	14.3487

Шаг решетки: 36.00

0.5	1.0031	0.974	0.2638	0.8581	0.2264	0.3669	1.1313	5.4978	53.3054	13.579
0.6	1.0045	0.9674	0.3295	0.8663	0.2855	0.4602	1.1631	7.9168	50.7765	13.689
0.7	1.0062	0.9603	0.388	0.8735	0.3389	0.5433	1.2037	10.7757	47.8076	13.7989
0.8	1.008	0.9528	0.4388	0.8796	0.386	0.615	1.2544	14.0743	44.399	13.9089
0.9	1.0102	0.9449	0.4823	0.8846	0.4266	0.6756	1.3164	17.8128	40.5506	14.0188

1	1.0126	0.9366	0.5192	0.8888	0.4615	0.726	1.3906	21.9911	36.2623	14.1288
1.1	1.0152	0.9278	0.5505	0.8921	0.4911	0.7675	1.4778	26.6093	31.5342	14.2388
1.2	1.0181	0.9187	0.5771	0.8948	0.5164	0.8013	1.5784	31.6672	26.3663	14.3487

где:

η – коэффициент размножения на тепловых нейтронах в топливе;

ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

φ – вероятность избежать резонансного захвата;

θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фикт. блока;

$\theta_ф$ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фикт. блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов;

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;

k_∞ – коэффициент размножения для бесконечной среды;

F – коэффициент экранировки (F);

$S_{топл}$ – площадь, занимаемая топливом;

$S_{тн}$ – площадь, занимаемая теплоносителем;

$S_{км}$ – площадь, занимаемая конструкционными материалами.

Водо-водяной энергетический реактор

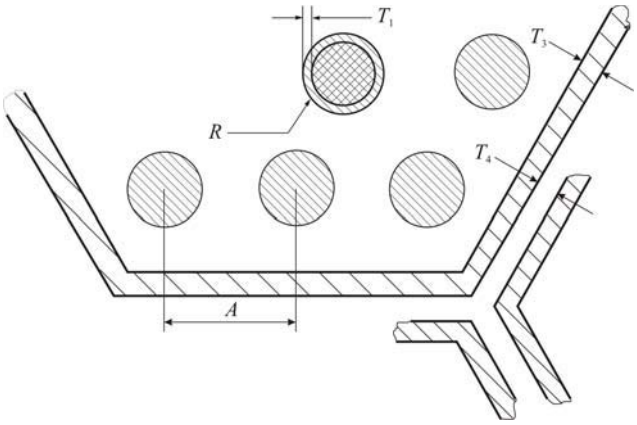


Рис. 4.6. Шестигранная ячейка водо-водяного реактора
T_1 – толщина оболочки, см; R – радиус твэл, см; T_3 – толщина оболочки кассеты, см; T_4 – толщина зазора между кассетами, см

Пример расчета

1. Исходные данные

Макросечение поглощения в конструкционном материале..... 0.196 $см^{-1}$

Макросечение транспортное в конструкционном материале .... 1.034 $см^{-1}$

Макросечение поглощения воды ..... 0.022 $см^{-1}$

Макросечение транспортное воды..... 2.31 $см^{-1}$

Замедляющая способность воды..... 1.35 $см^{-1}$

Замедляющая способность топлива..... 0.052 $см^{-1}$

Замедляющая способность конструкционного материала ..... 0.03 $см^{-1}$

Температура горючего (средняя) .....293 К
Плотность воды.....1.0 г/см^3
Макросечение поглощения твэл..... 0.359 см$^{-1}$
Макросечение поглощения топлива (урана) в твэл..... 0.359 см$^{-1}$
Транспортное макросечение твэл..... 0.819 см$^{-1}$
Микросечение поглощения U^{235} ..... 496.076 барн
Микросечение деления U^{235} ..... 422.72 барн
Микросечение поглощения U^{238} ..... 1.968 барн
Обогащение горючего по U^{235} 0.024
Пористость блока по U^{238} 0.536
Нижнее значение величины шага решетки .....1 см
Верхнее значение величины шага решетки .....3 см
Интервал изменения шага решетки .....0.2 см
Нижнее значение внешнего радиуса твэл .....0.2 см
Верхнее значение внешнего радиуса твэл.....0.35 см
Интервал изменения радиуса твэл .....0.025 см
Площадь дополнительных материалов в ТК.....0.134 см^2
Толщина внешней оболочки твэл .....0.025 см
Толщина стенки кассеты.....0.05 см
Толщина водяного зазора между кассетами .....6.0 см
Число твэл в крайнем ряду кассеты 6

2. Таблица выходных данных

Число вторичных нейтронов на один акт деления – 1,8124 (η)

$R_{твэл}$	ε	φ	θ_0	$\theta_ф$	θ	k_∞	F	$S_{топл}$	$S_{т/н}$	$S_{км}$

Шаг решетки: 1.00

0.2	1.0039	0.979	0.5534	0.8726	0.4829	0.8601	1.0092	0.1257	2.7765	0.1857
0.225	1.0046	0.9743	0.6057	0.8963	0.5428	0.9629	1.0105	0.159	2.7392	0.1897
0.25	1.0053	0.9693	0.6501	0.9171	0.5962	1.0529	1.0119	0.1963	2.6979	0.1936
0.275	1.0061	0.9637	0.6878	0.9355	0.6434	1.1307	1.0135	0.2376	2.6528	0.1975
0.3	1.007	0.9576	0.7199	0.9516	0.6851	1.1974	1.0152	0.2827	2.6037	0.2014
$R_{твэл}$	ε	φ	θ_0	$\theta_ф$	θ	k_∞	F	$S_{топл}$	$S_{т/н}$	$S_{км}$
0.325	1.008	0.9509	0.7474	0.9658	0.7219	1.254	1.017	0.3318	2.5507	0.2054
0.35	1.009	0.9437	0.7711	0.9783	0.7543	1.3017	1.019	0.3848	2.4937	0.2093

Шаг решетки: 1.40

0.2	1.0033	0.9869	0.5438	0.7286	0.3962	0.7111	1.0094	0.1257	4.4892	0.1931
0.225	1.0039	0.9841	0.5965	0.7617	0.4544	0.8136	1.0107	0.159	4.4519	0.197
0.25	1.0045	0.981	0.6415	0.7921	0.5082	0.9076	1.0121	0.1963	4.4107	0.2009
0.275	1.0051	0.9777	0.6799	0.8198	0.5574	0.9927	1.0137	0.2376	4.3655	0.2049
0.3	1.0057	0.9741	0.7127	0.8448	0.6021	1.069	1.0154	0.2827	4.3165	0.2088
0.325	1.0064	0.9703	0.7407	0.8674	0.6425	1.1371	1.0172	0.3318	4.2634	0.2127
0.35	1.0071	0.9661	0.7649	0.8877	0.679	1.1974	1.0192	0.3848	4.2065	0.2166

Шаг решетки: 1.80

0.2	1.0031	0.9909	0.5345	0.5971	0.3192	0.575	1.0096	0.1257	6.4791	0.2004
0.225	1.0035	0.989	0.5877	0.6339	0.3725	0.6701	1.0109	0.159	6.4418	0.2044
0.25	1.004	0.9869	0.6333	0.6688	0.4235	0.7606	1.0123	0.1963	6.4006	0.2083
0.275	1.0046	0.9846	0.6722	0.7016	0.4716	0.8454	1.0139	0.2376	6.3554	0.2122
0.3	1.0051	0.9822	0.7055	0.7321	0.5165	0.9241	1.0156	0.2827	6.3063	0.2161
0.325	1.0056	0.9796	0.7342	0.7604	0.5582	0.9967	1.0174	0.3318	6.2533	0.2201
0.35	1.0062	0.9768	0.7589	0.7865	0.5968	1.0632	1.0194	0.3848	6.1964	0.224

Шаг решетки: 2.20

0.2	1.0029	0.9933	0.5256	0.4876	0.2563	0.4627	1.0097	0.1257	8.7461	0.2078
0.225	1.0033	0.9918	0.5791	0.5239	0.3034	0.5472	1.011	0.159	8.7088	0.2117
0.25	1.0038	0.9903	0.6252	0.5592	0.3496	0.6298	1.0125	0.1963	8.6676	0.2156
0.275	1.0042	0.9886	0.6647	0.5933	0.3943	0.7096	1.0141	0.2376	8.6224	0.2196
0.3	1.0047	0.9869	0.6985	0.6258	0.4372	0.7856	1.0158	0.2827	8.5733	0.2235
0.325	1.0052	0.985	0.7277	0.6567	0.4779	0.8575	1.0176	0.3318	8.5203	0.2274
0.35	1.0057	0.983	0.7529	0.6858	0.5163	0.9251	1.0196	0.3848	8.4634	0.2313

Шаг решетки: 2.60

0.2	1.0028	0.9948	0.5169	0.4002	0.2069	0.374	1.0099	0.1257	11.2903	0.2151
0.225	1.0032	0.9937	0.5708	0.4337	0.2475	0.4472	1.0112	0.159	11.253	0.219
0.25	1.0036	0.9925	0.6173	0.4671	0.2883	0.5205	1.0127	0.1963	11.2117	0.223
0.275	1.0041	0.9912	0.6573	0.5	0.3286	0.5928	1.0142	0.2376	11.1666	0.2269
0.3	1.0045	0.9899	0.6917	0.532	0.368	0.6632	1.016	0.2827	11.1175	0.2308
0.325	1.0049	0.9884	0.7214	0.563	0.4061	0.7311	1.0178	0.3318	11.0645	0.2348
0.35	1.0054	0.9869	0.747	0.5928	0.4428	0.7963	1.0198	0.3848	11.0075	0.2387

Шаг решетки: 3.00

0.2	1.0027	0.9958	0.5085	0.3315	0.1686	0.305	1.0101	0.1257	14.1115	0.2225
0.225	1.0031	0.9949	0.5627	0.3614	0.2034	0.3679	1.0114	0.159	14.0742	0.2264
$R_{твэл}$	ε	φ	θ_0	$\theta_ф$	θ	k_∞	F	$S_{топл}$	$S_{т/н}$	$S_{км}$
0.25	1.0035	0.994	0.6096	0.3918	0.2388	0.4318	1.0129	0.1963	14.033	0.2303
0.275	1.0039	0.993	0.6501	0.4222	0.2744	0.4958	1.0144	0.2376	13.9878	0.2342
0.3	1.0043	0.9919	0.685	0.4523	0.3098	0.5593	1.0161	0.2827	13.9387	0.2382
0.325	1.0047	0.9908	0.7151	0.4818	0.3446	0.6217	1.018	0.3318	13.8857	0.2421
0.35	1.0052	0.9895	0.7413	0.5107	0.3786	0.6824	1.02	0.3848	13.8288	0.246

Здесь:

η – коэффициент размножения на тепловых нейтронах в топливе;

ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

φ – вероятность избежать резонансного захвата;

θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фикт. блока;

$\theta_ф$ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фикт. блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов;

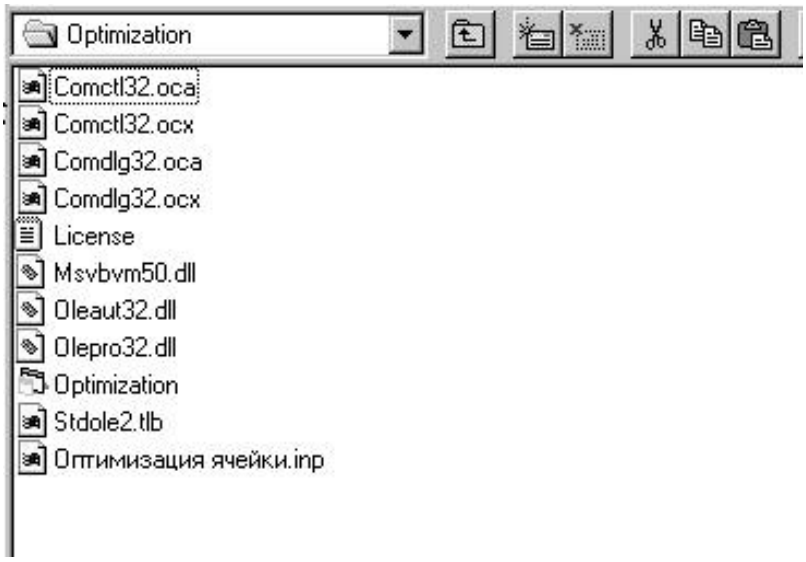
θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;

k_∞ – коэффициент размножения для бесконечной среды;
F – коэффициент экранировки (F);
$S_{топл}$ – площадь, занимаемая топливом;
$S_{тн}$ – площадь, занимаемая теплоносителем;
$S_{км}$ – площадь, занимаемая конструкционными материалами.

Порядок работаы с программой

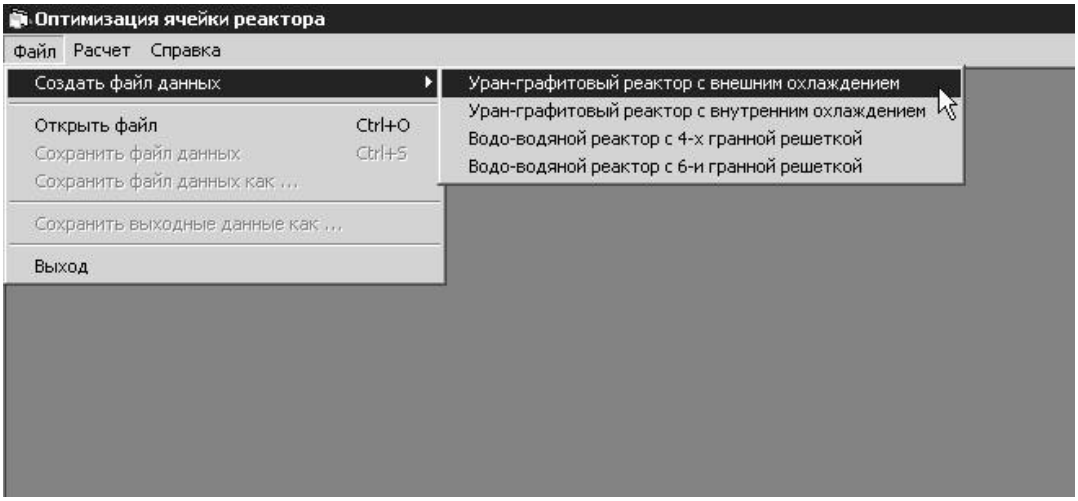
1. Запуск приложения

На диске L, в директории L:\Study\Opt_Cell находится программа расчета оптимизации ячейки ядерного реактора. В указанном месте находим программу Optimization.exe.

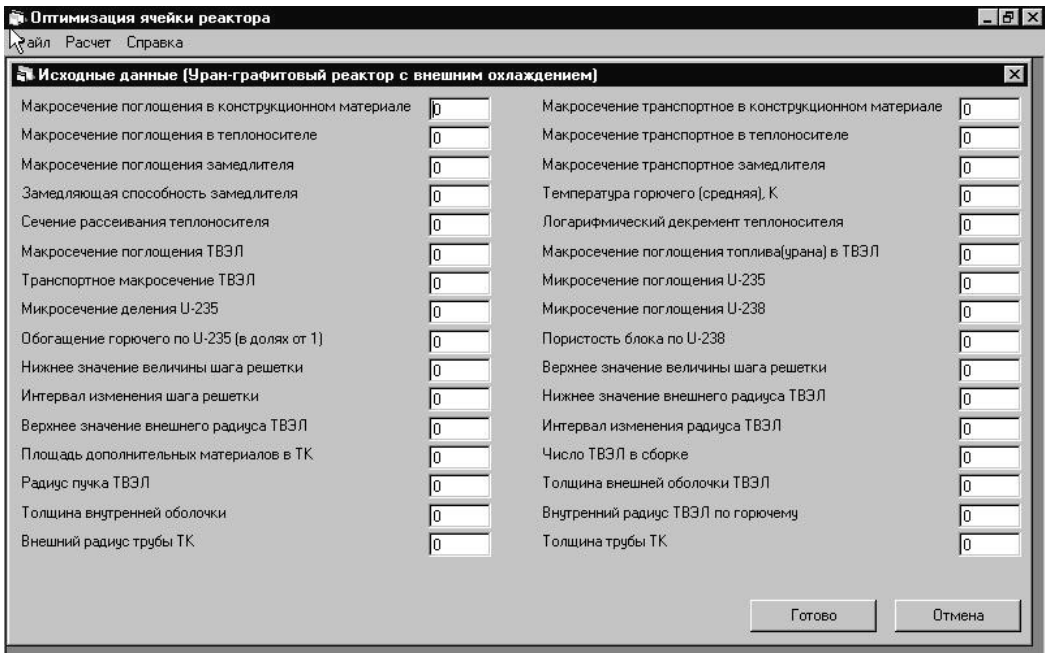


2. Создание входных данных

После запуска программы в меню **Файл → Создать файл данных** необходимо выбрать тип реактора, предназначенного для расчета.



В загрузившемся окне необходимо ввести исходные данные для расчета.



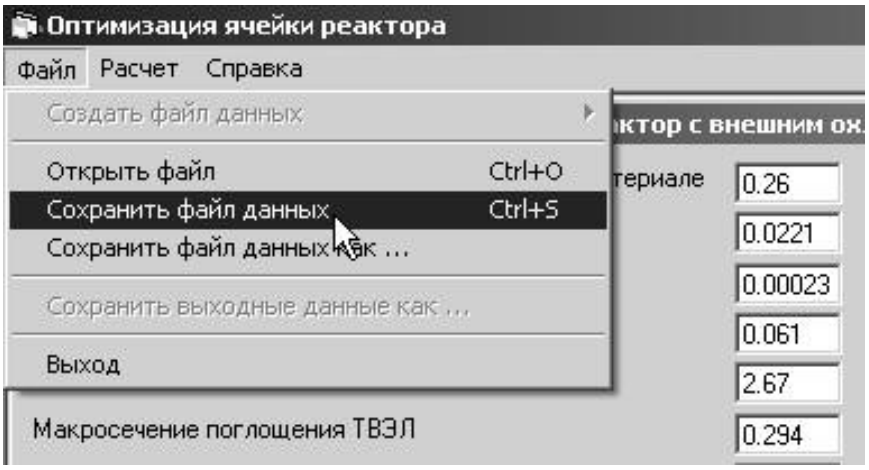
Внимание! Необходимо помнить о размерностях вводимых величин.

После ввода данных необходимо нажать кнопку **Готово** для сохранения в памяти результатов. После нажатия программа готова к расчету.

3. Сохранение результатов

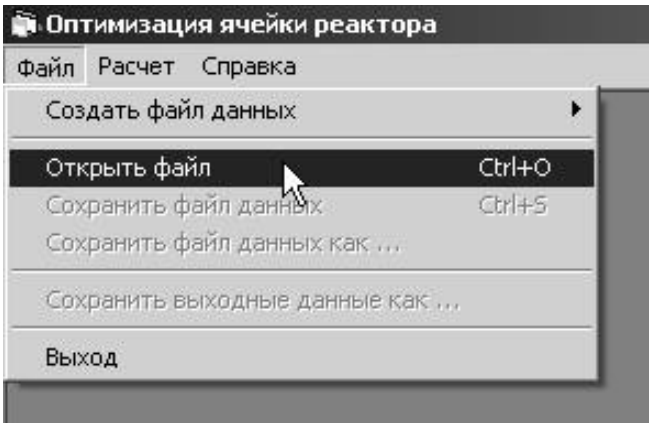
Для удобства пользования введенные результаты можно сохранить на диск для дальнейшего редактирования и расчета. При изменении данных программа предлагает сохранить изменения автоматически.

Для явного сохранения результатов необходимо выбрать пункт меню **Файл → Сохранить** или **Файл → Сохранить как**.



4. Использование сохраненных данных

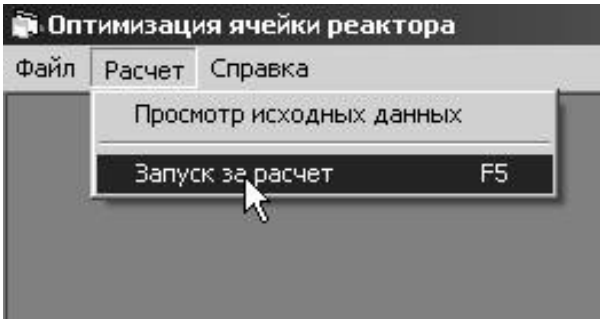
Для повторного использования сохраненных данных необходимо открыть ранее сохраненный файл данных. **Пункт меню Файл → Открыть файл**.



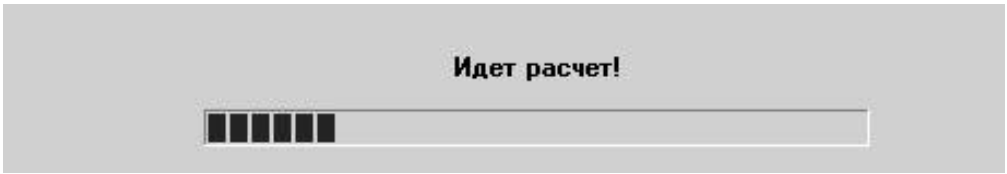
После нажатия клавиши **Готово** программа готова к расчету.

5. Запуск на расчет

После ввода данных программа готова к расчету. Запуск на расчет осуществляется через пункт меню **Расчет → Запуск** на расчет или нажатием клавиши **F5**.

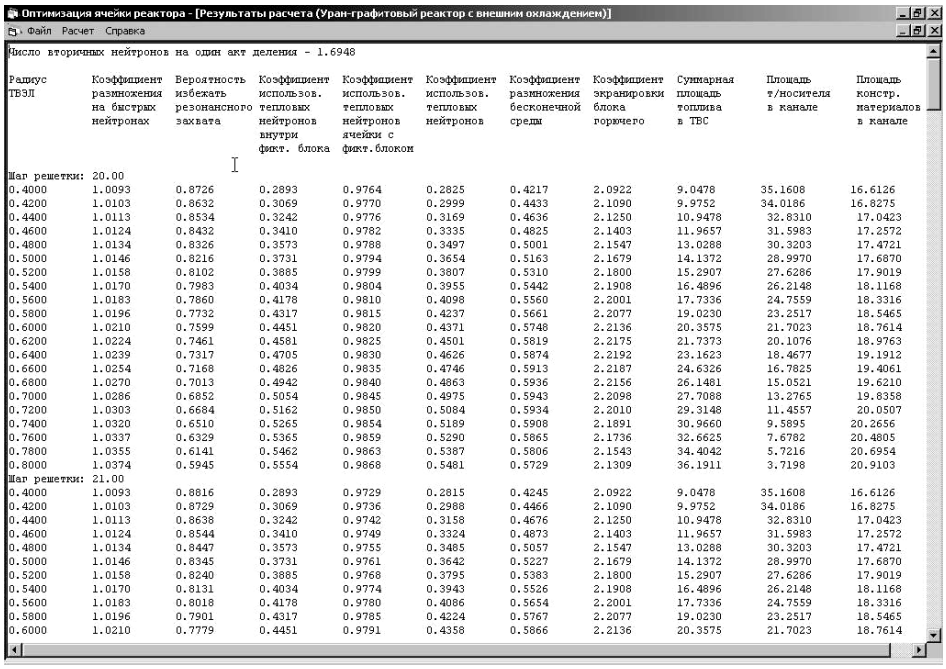


При правильном вводе данных появится индикатор прогресса расчета.



6. Результаты расчета

По окончанию расчета все полученные данные будут представлены в виде текстовой таблицы.



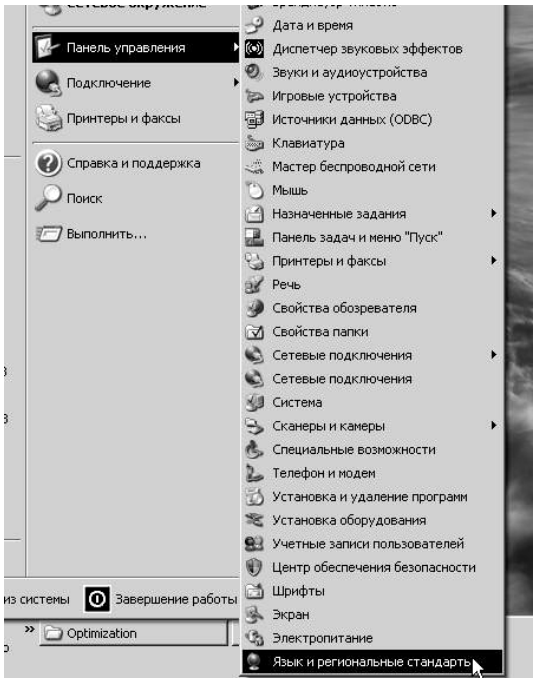
Число вторичных нейтронов на один акт деления - 1.6948

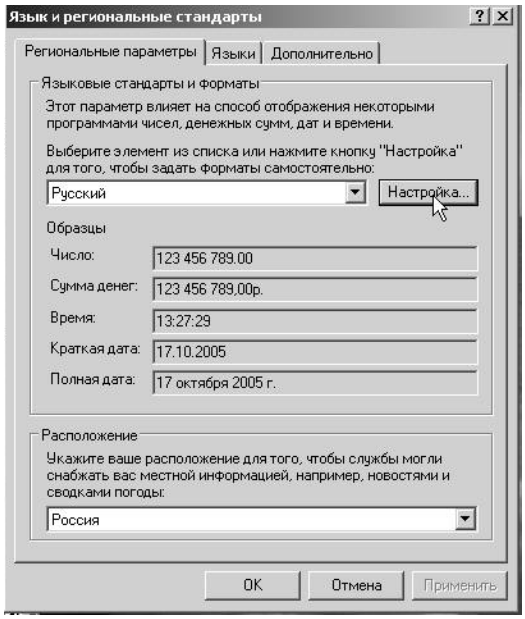
Радиус ТВЭЛ	Коэффициент размножения на быстрых нейтронах	Вероятность избежать резонансного захвата	Коэффициент использов. тепловых нейтронов внутри фикт. блока	Коэффициент использов. тепловых нейтронов ячейки с фикт.блоком	Коэффициент использов. тепловых нейтронов	Коэффициент размножения бесконечной среды	Коэффициент экранировки блока горючего	Суммарная площадь топлива в ТВС	Площадь т/носителя в канале	Площадь констр. материалов в канале
Шаг решетки: 20.00										
0.4000	1.0093	0.8726	0.2893	0.9764	0.2825	0.4217	2.0922	9.0478	35.1608	16.6126
0.4200	1.0103	0.8632	0.3069	0.9770	0.2999	0.4433	2.1090	9.9752	34.0186	16.8275
0.4400	1.0113	0.8534	0.3242	0.9776	0.3169	0.4636	2.1250	10.9478	32.8310	17.0423
0.4600	1.0124	0.8432	0.3410	0.9782	0.3335	0.4825	2.1403	11.9657	31.5983	17.2572
0.4800	1.0134	0.8326	0.3573	0.9788	0.3497	0.5001	2.1547	13.0288	30.3203	17.4721
0.5000	1.0146	0.8216	0.3731	0.9794	0.3654	0.5163	2.1679	14.1372	28.9970	17.6870
0.5200	1.0158	0.8102	0.3885	0.9799	0.3807	0.5310	2.1800	15.2907	27.6286	17.9019
0.5400	1.0170	0.7983	0.4034	0.9804	0.3955	0.5442	2.1908	16.4896	26.2148	18.1168
0.5600	1.0183	0.7860	0.4178	0.9810	0.4098	0.5560	2.2001	17.7336	24.7559	18.3316
0.5800	1.0196	0.7732	0.4317	0.9815	0.4237	0.5661	2.2077	19.0230	23.2517	18.5465
0.6000	1.0210	0.7599	0.4451	0.9820	0.4371	0.5748	2.2136	20.3575	21.7023	18.7614
0.6200	1.0224	0.7461	0.4581	0.9825	0.4501	0.5819	2.2175	21.7373	20.1076	18.9763
0.6400	1.0239	0.7317	0.4705	0.9830	0.4626	0.5874	2.2192	23.1623	18.4677	19.1912
0.6600	1.0254	0.7168	0.4826	0.9835	0.4746	0.5913	2.2187	24.6326	16.7825	19.4061
0.6800	1.0270	0.7013	0.4942	0.9840	0.4863	0.5936	2.2156	26.1481	15.0521	19.6210
0.7000	1.0286	0.6852	0.5054	0.9845	0.4975	0.5943	2.2098	27.7088	13.2765	19.8358
0.7200	1.0303	0.6684	0.5162	0.9850	0.5084	0.5934	2.2010	29.3148	11.4557	20.0507
0.7400	1.0320	0.6510	0.5265	0.9854	0.5189	0.5908	2.1891	30.9660	9.5895	20.2656
0.7600	1.0337	0.6329	0.5365	0.9859	0.5290	0.5865	2.1736	32.6625	7.6782	20.4805
0.7800	1.0355	0.6141	0.5462	0.9863	0.5387	0.5806	2.1543	34.4042	5.7216	20.6954
0.8000	1.0374	0.5945	0.5554	0.9868	0.5481	0.5729	2.1309	36.1911	3.7198	20.9103
Шаг решетки: 21.00										
0.4000	1.0093	0.8816	0.2893	0.9729	0.2815	0.4245	2.0922	9.0478	35.1608	16.6126
0.4200	1.0103	0.8729	0.3069	0.9736	0.2988	0.4466	2.1090	9.9752	34.0186	16.8275
0.4400	1.0113	0.8638	0.3242	0.9742	0.3158	0.4676	2.1250	10.9478	32.8310	17.0423
0.4600	1.0124	0.8544	0.3410	0.9749	0.3324	0.4873	2.1403	11.9657	31.5983	17.2572
0.4800	1.0134	0.8447	0.3573	0.9755	0.3485	0.5057	2.1547	13.0288	30.3203	17.4721
0.5000	1.0146	0.8345	0.3731	0.9761	0.3642	0.5227	2.1679	14.1372	28.9970	17.6870
0.5200	1.0158	0.8240	0.3885	0.9768	0.3795	0.5383	2.1800	15.2907	27.6286	17.9019
0.5400	1.0170	0.8131	0.4034	0.9774	0.3943	0.5526	2.1908	16.4896	26.2148	18.1168
0.5600	1.0183	0.8018	0.4178	0.9780	0.4086	0.5654	2.2001	17.7336	24.7559	18.3316
0.5800	1.0196	0.7901	0.4317	0.9785	0.4224	0.5767	2.2077	19.0230	23.2517	18.5465
0.6000	1.0210	0.7779	0.4451	0.9791	0.4358	0.5866	2.2136	20.3575	21.7023	18.7614

Для распечатки и сохранения в нужном формате результаты расчета необходимо выделить и вставить в буфер обмена (**Ctrl + C**), после чего данные легко вставить в любой текстовый редактор.

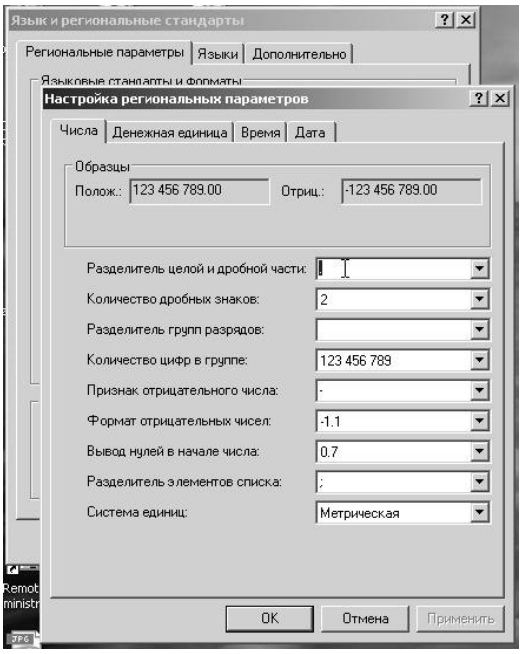
7. Настройка системы

Для корректной работы программы необходимо настроить операционную систему для работы с числами. Для этого необходимо выбрать кнопку **Пуск → Настройка → Панель управления → Язык и стандарты** (**Start → Settings → Control Panel → Regional Settings**), как показано на рисунке.





Потом нажать кнопку **Настройка** (**Settings**) и в поле **Разделитель целой и дробной части** заменить **запятую** «,» на **точку** «.».



Затем применить измененные настройки.

Расчет нейтронных потоков

Двухгрупповая теория является одним из наиболее применяемых методов определения критических условий для реактора с отражателем на тепловых нейтронах. Уравнение баланса быстрых и тепловых нейтронов для активной зоны имеет вид

$$D_{\text{т}} \cdot \nabla^2 \Phi_{\text{т}} - \Sigma_a^{\text{т}} \cdot \Phi_{\text{т}} + \varphi \cdot \Sigma_a^{\text{б}} \cdot \Phi_{\text{б}} = 0 \,,$$

$$D_{б} \cdot \nabla^2 \Phi_{т} - \Sigma_{б} \cdot \Phi_{б} + \frac{k_{\infty}}{\varphi} \cdot \Sigma_{т}^{a} \cdot \Phi_{т} = 0 \,,$$

$$\Sigma_{б} = \frac{D_{б}}{\tau}, \qquad \Sigma_{т}^{a} = \frac{D^{б}}{L_{т}^2} \,.$$

Общие решения уравнений для двухзонного реактора (активная зона + отражатель) могут быть представлены так:

а) активная зона:

$$\Phi_{б} = A \cdot J_0(\mu \cdot r) + B \cdot I_0(\nu \cdot r),$$
$$\Phi_{т} = S_1 \cdot A \cdot J_0(\mu \cdot r) + S_2 \cdot B \cdot I_0(\nu \cdot r);$$

б) отражатель:

$$\Phi_{б} = C \cdot Z_2,$$
$$\Phi_{т} = D \cdot Z_1 + S_3 \cdot C \cdot Z_2,$$

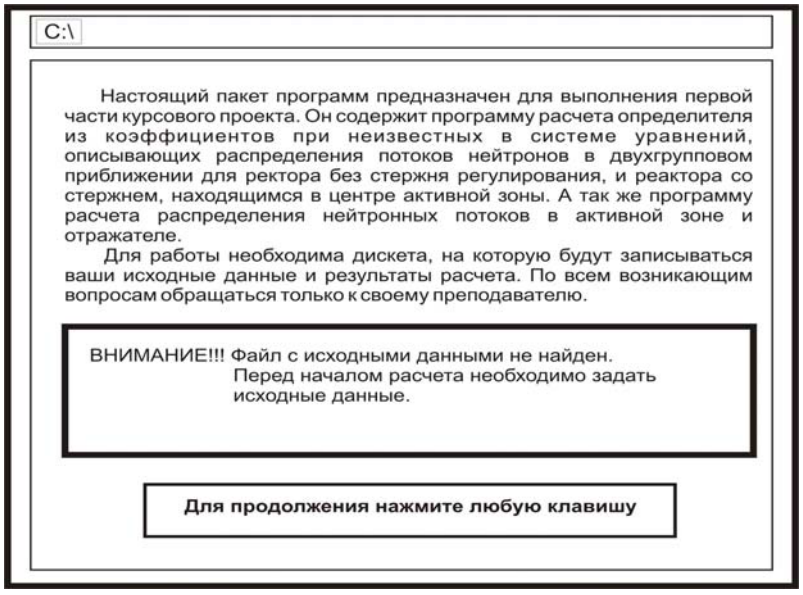
где A, B, C, D – постоянные; $J_0(\mu r)$, $I_0(\mu r)$ – функции Бесселя нулевого порядка действительного и мнимого аргумента соответственно. Здесь приняты следующие обозначения:

$$\mu = \sqrt{\chi_1^2 - \left(\frac{\pi}{H}\right)^2} \;;\; a_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{отр}^2} + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2} \;;$$

$$\nu = \sqrt{\chi_2^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2} \;;\; a_2 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{отр}} + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2} \;;$$

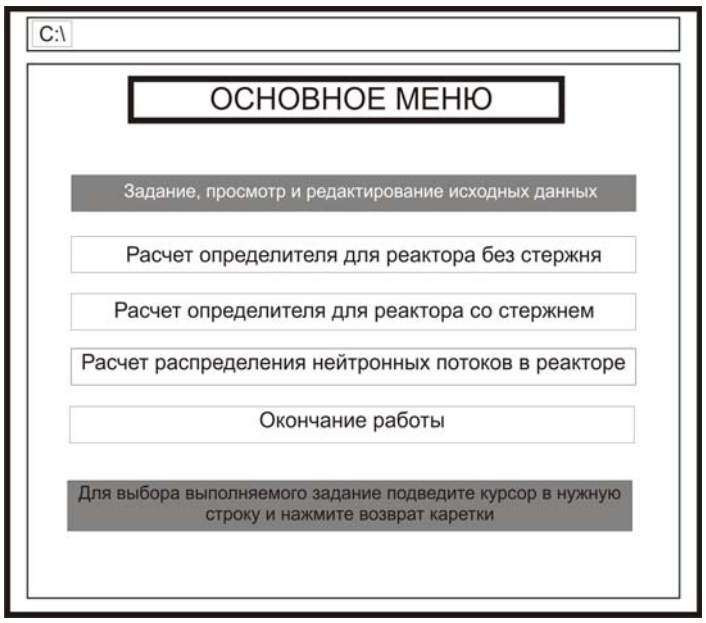
$$\chi_{1,2}^2 = \mp \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{L_{АЗ}^2} + \frac{1}{\tau}\right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{L_{АЗ}^2} + \frac{1}{\tau}\right)^2 + \frac{k'_{\infty} - 1}{L_{АЗ}^2 \cdot \tau}} \,.$$

Для выполнения расчетов необходимо воспользоваться программой Reactor.exe, разработанной на кафедре 21 физико-технического факультета. После запуска программы загрузится следующее окно:



После этого необходимо нажать любую клавишу и загрузится окно для выбора действия:

1. Задание, просмотр и редактирование исходных данных.
2. Расчет определителя для реактора без стержня.
3. Расчет определителя для реактора со стержнем.
4. Расчет распределений нейтронных потоков в реакторе.



Необходимо выбрать первый пункт и ввести начальные данные в тех единицах измерения, которые указаны программой.

После задания начальных данных их следует сохранить. Начальные данные сохраняются в **корне диска U** с названием INP_DATA.dat. После этого необходимо выполнить расчеты определителя, а затем распределения нейтронных потоков и результаты расчета сохранить в файл. Результаты расчета также сохраняются в **корне диска U** с названием OUT_DATA.dat.

Пример расчета

Исходные данные

Радиус активной зоны ..... 404.765 [см]
Высота активной зоны ..... 674.624 [см]
Толщина отражателя ..... 84.700 [см]
Эффективная добавка за счет отражателя ..... 57.960 [см]
Коэффициент диффузии в АЗ для БН 1.203
Коэффициент диффузии в АЗ для ТН 0.781
Коэффициент диффузии в отражателе для БН 1.118
Коэффициент диффузии в отражателе для ТН 0.900
Вероятность избежать резонансного захвата 0.833
Возраст нейтронов в активной зоне ..... 432.000 [см^2]

Возраст нейтронов в отражателе ..... 352.000 [см^2]
Квадрат длины диффузии в активной зоне ..... 100.000 [см^2]
Квадрат длины диффузии в отражателе ..... 2756.250 [см^2]

Выходные данные программы

K = 1.024585

0.2253E + 0	0.2170E + 19	0.1719E + 13	0.0000E + 0
0.6350E – 1	– 0.2602E + 19	– 0.2448E + 13	0.9721E + 4
– 0.3425E – 2	0.2872E + 18	– 0.1029E + 12	0.0000E + 0
– 0.6268E – 3	– 0.2236E + 18	0.1179E + 12	– 0.1853E + 3

Значение определителя ..... – 2.4571E + 28

K = 1.024591

0.2250E + 0	0.2170E + 19	0.1719E + 13	0.0000E + 0
0.6343E – 1	– 0.2602E + 19	– 0.2448E + 13	0.9721E + 4
– 0.3426E – 2	0.2872E + 18	– 0.1029E + 12	0.0000E + 0
– 0.6269E – 3	– 0.2236E + 18	0.1179E + 12	– 0.1853E + 3

Значение определителя ..... + 1.0345E + 28

Рассчитанное значение коэффициента... 1.024588

K = 1.026550

– 0.2294E – 1	0.1293E + 22	0.5049E + 0	0.4311E – 22
– 0.6465E – 2	– 0.1548E + 22	0.1423E + 0	– 0.5163E – 22
– 0.8406E – 5	0.3718E – 2	0.1061E + 1	– 0.1654E + 1
– 0.2818E + 0	0.1191E + 1	0.1613E + 1	0.7099E + 1

Значение определителя ..... – 2.5534E + 18

K = 1.026556

– 0.2320E – 1	0.1293E + 22	0.5048E + 0	0.4311E – 22
– 0.6536E – 2	– 0.1548E + 22	0.1423E + 0	– 0.5163E – 22
– 0.8410E – 5	0.3718E – 2	0.1061E + 1	– 0.1654E + 1
– 0.2818E + 0	0.1191E + 1	0.1613E + 1	0.7099E + 1

Значение определителя ..... + 2.4371E + 18

Рассчитанное значение коэффициента... 1.026553

Для активной зоны

R, см	$\Phi_{БН}$	$\Phi_{ТН}$
0.1000E–001	0.1000E+001	0.2819E+000
0.1350E+002	0.9989E+000	0.2816E+000
0.2699E+002	0.9956E+000	0.2806E+000
0.4049E+002	0.9900E+000	0.2791E+000
0.5398E+002	0.9823E+000	0.2769E+000
0.6747E+002	0.9725E+000	0.2741E+000
0.8096E+002	0.9605E+000	0.2707E+000
0.9445E+002	0.9464E+000	0.2668E+000

0.1079E+003	0.9303E+000	0.2622E+000
0.1214E+003	0.9122E+000	0.2571E+000
0.1349E+003	0.8922E+000	0.2515E+000
0.1484E+003	0.8703E+000	0.2453E+000
0.1619E+003	0.8466E+000	0.2386E+000
0.1754E+003	0.8212E+000	0.2315E+000
0.1889E+003	0.7942E+000	0.2239E+000
0.2024E+003	0.7657E+000	0.2158E+000
0.2159E+003	0.7357E+000	0.2074E+000
0.2294E+003	0.7044E+000	0.1985E+000
0.2429E+003	0.6718E+000	0.1894E+000
0.2564E+003	0.6381E+000	0.1799E+000
0.2698E+003	0.6033E+000	0.1701E+000
0.2833E+003	0.5677E+000	0.1600E+000
0.2968E+003	0.5312E+000	0.1497E+000
0.3103E+003	0.4941E+000	0.1393E+000
0.3238E+003	0.4564E+000	0.1287E+000
0.3373E+003	0.4182E+000	0.1179E+000
0.3508E+003	0.3797E+000	0.1072E+000
0.3643E+003	0.3405E+000	0.9689E–001
0.3778E+003	0.2997E+000	0.8846E–001
0.3913E+003	0.2518E+000	0.8854E–001
0.4048E+003	0.1729E+000	0.1262E+000

Для отражателя

R, см	$\Phi_{БН}$	$\Phi_{ТН}$
0.4048E+003	0.1729E+000	0.1262E+000
0.4104E+003	0.1278E+000	0.1480E+000
0.4161E+003	0.9445E–001	0.1573E+000
0.4217E+003	0.6980E–001	0.1577E+000
0.4274E+003	0.5157E–001	0.1522E+000
0.4330E+003	0.3808E–001	0.1428E+000
0.4386E+003	0.2809E–001	0.1308E+000
0.4443E+003	0.2069E–001	0.1173E+000
0.4499E+003	0.1519E–001	0.1029E+000
0.4556E+003	0.1109E–001	0.8804E–001
0.4612E+003	0.8005E–002	0.7309E–001
0.4669E+003	0.5662E–002	0.5819E–001
0.4725E+003	0.3841E–002	0.4341E–001
0.4782E+003	0.2376E–002	0.2880E–001
0.4838E+003	0.1133E–002	0.1434E–001
0.4895E+003	0.5193E–016	0.6975E–015

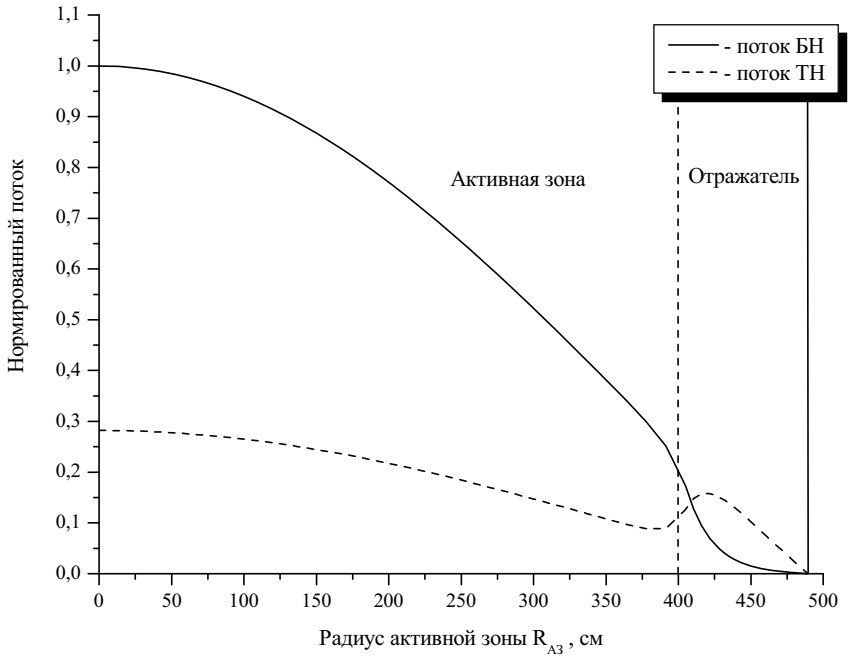


Рис. 7. Распределение потока быстрых и тепловых нейтронов по активной зоне и в отражателе

Предварительный расчет системы органов регулирования

Регулирование тепловых реакторов осуществляется чаще всего с помощью стержней, сильно поглощающих нейтроны, которые вводятся в реактор для компенсации избыточной реактивности. В процессе работы запас реактивности падает (отравление, шлакование, выгорание топлива) и поэтому необходимо освобождать скомпенсированный запас реактивности, выводя стержни из реактора.

Компенсирующая способность стержня характеризуется разностью

$$\Delta k = k_{эфф} - k^{э}_{эфф.ст.},$$

где $k^{'}_{эфф}$ – коэффициент размножения со стержнем.

Эффективность стержня зависит от размеров и формы стержня, поглощающей способности материалов стержня, места введения стержня в реакторе и от размеров и физических характеристик самого реактора. Обычно компенсирующая способность одного стержня невелика и, чтобы скомпенсировать весь запас реактивности, требуется размещение большого количества стержней.

Рассмотрим общий подход при определении эффективности системы регулирования в двухгрупповом диффузионном приближении. Наличие отражателя будем учитывать эффективной добавкой $\delta \cdot R_{экв} = R_{а.з} + \delta$. Вначале проводят расчёт стержня, помещенного в центр реактора (вдоль его вертикальной оси).

Решение диффузионного уравнения со стержнем в центре имеет вид:

$$\Phi_б = A_1 J_0(\mu r) + B I_0(\nu r) + C Y_0(\mu r) + D k_0(\nu r),$$
$$\Phi_T = S_1 A_1 J_0(\mu r) + S_2 B I_0(\nu r) + S_1 C Y_0(\mu r) + S_2 D k_0(\nu r).$$

На поверхности стержня задаются следующие граничные условия:

$$\frac{1}{\Phi_б}\frac{\partial \Phi_б}{\partial r}\bigg|_{r=r_0} = \frac{1}{3\gamma_б D_б},$$

$$\frac{1}{\Phi_T}\frac{\partial \Phi_T}{\partial r}\bigg|_{r=r_0} = \frac{1}{3\gamma_T D_T}.$$

Поскольку учёт поглощения промежуточных нейтронов в стержнях связан с довольно трудоёмким усреднением функции $1/\gamma(E)$ предположим, что стержень поглощает только тепловые нейтроны, является для них абсолютно черным. По отношению к быстрым нейтронам он является «прозрачным». Следовательно, правая часть первого граничного условия будет равна нулю. γ_T – показатель «черноты» для тепловых нейтронов, который является функцией радиуса цилиндрического стержня и среднего макроскопического транспортного сечения нейтронов в активной зоне.

Используя обычные граничные диффузионные условия $\Phi_\delta(R_{эфф}) = 0$ и граничные условия, получаем систему однородных уравнений относительно неизвестных A, B, C, D. Эта система имеет решение, если определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных, равен нулю.

$$\begin{vmatrix} J_0(\mu R_{экв}) & I_0(\nu R_{экв}) & Y_0(\mu R_{экв}) & k_0(\nu R_{экв}) \\ S_1 J_0(\mu R_{экв}) & S_2 I_0(\nu R_{экв}) & S_3 Y_0(\mu R_{экв}) & S_2 k_0(\nu R_{экв}) \\ J_0(\mu r_c) & I_0(\nu r_c) & Y_0(\mu R_{экв}) & k_0(\nu R_c) \\ S_1 q_1^\gamma & S_2 q_2^\gamma & S_1 q_3^\gamma & S_2 q_4^\gamma \end{vmatrix} = 0.$$

Здесь

$$R_{экв} = R_{а.з.} + \delta,$$
$$q_1^\gamma = 3\gamma_T D_T J_0'(\mu r_c) - J_0(\mu r_c),$$
$$q_2^\gamma = 3\gamma_T D_T I_0'(\mu r_c) - I_0(\mu r_c),$$
$$q_3^\gamma = 3\gamma_T D_T Y_0'(\mu r_c) - Y_0(\mu r_c),$$
$$q_4^\gamma = 3\gamma_T D_T k_0'(\mu r_c) - k_0(\mu r_c),$$

r – геометрический радиус поглощающего стержня.

При определении компенсирующей способности стержня необходимо воспользоваться разработанной программой.

Дальнейший ход решения следующий:

1. Задаются несколькими значениями $k_\infty' = k_\infty / k_{эфф}$.
2. При этих значениях определяют необходимые для расчёта параметры.

3. Графическим способом определяют, при каком значении определитель $\Delta = 0$.

Значение $k_{эфф}^{ст}$, определённое из $k_{\infty}^{'ст}$ при $\Delta = 0$, и является искомым значением $k_{эфф}^{ст}$ для реактора со стержнем.

Стержень, проставленный эксцентрично, имеет меньшую компенсирующую способность по сравнению с таким же стержнем в центре активной зоны. Из элементарной теории возмущений приближенно следует, что стержень, помещенный на расстоянии R_i от центра, имеет компенсирующую способность

$$\Delta k_i = \Delta k_0 J_0^2 (\mu R_i).$$

Общая компенсирующая способность системы стержней

$$\sum_i \Delta k_i = \Delta k_0 \sum_i J_0^2 (\mu R_i).$$

Если известна Δk_0 полный запас реактивности, то число регулирующих стержней будет равно:

$$N_{рег} = \frac{\ln k_{эфф}}{\Delta k_0 \left[J_0^2 (\mu R) + J_1^2 (\mu R) \right]},$$

где R – радиус активной зоны.

После того, как в проектируемом реакторе намечено положение каждого стержня, компенсирующая способность системы стержней можно уточнить по формуле общей компенсирующей способности системы стержней.

При больших значениях $k_{эфф}$ возникает необходимость в применении выгорающих поглотителей. Выгорающие поглотители позволяют свести до минимума число подвижных ПС, увеличить первоначальную нагрузку.

На первоначальной стадии проектирования ограничимся рассмотрением компенсации реактивности с помощью гомогенного размещения поглотителя в топливе. В этом случае расчет необходимой концентрации ВП выполняют по следующему алгоритму.

Уменьшение ρ при введении в активную зону ВП определяется следующим образом:

$$\rho_{вп} = -\frac{\Theta \cdot \sigma_{aВП} \cdot N_{ВП}}{\Sigma_{aU}}.$$

Для компенсации $\rho_{вп} = \rho_{выг} + \rho_{шл}$ необходимо иметь в активной зоне следующее количество ВП:

$$m_{ВП} = \frac{N_{ВП} \cdot A_{ВП} \cdot V_U}{6.023 \cdot 10^{23}},\ \text{г}.$$

При $V_U \neq V_{ВП}$ необходимо V_U заменить на $V_{ВП}$.

Если требуется уточнить характер изменения реактивности, а также концентрации топлива и выгорающего поглотителя от времени, то необходимо воспользоваться следующим соотношением:

$$N_{ВП}(t) = N^0_{ВП}\left[\frac{N_5(t)}{N^0_5}\right]\frac{\sigma_{ВП}}{\sigma_{a5}},$$

где $N^0_{ВП}$ – концентрация ядер выгорающего поглотителя в начале кампании.

В отличие от ранее выполненного расчета реактора без поглотителя в данном случае в расчетные формулы для θ и L^2 добавляется значение $\Sigma_{аВП}$.

Все остальные характеристики практически не меняются. В случае жидкостного (борного) регулирования расчет необходимого количества раствора (обычно 10 %) борной кислоты H_3BO_3 проводят по следующим соотношениям:

$$N_B = -\rho_B \frac{\Sigma_{aU}\cdot V}{\Theta\cdot\sigma_{aB}\cdot V_{вод}},$$

где V – объем активной зоны, м^3; $V_{вод}$ – объем воды в активной зоне, м^3.

Для обеспечения такой концентрации бора в активной зоне необходимо, чтобы такая концентрация его была во всем контуре

$$m_B \frac{N_B\cdot A_B\cdot V_k}{6.023\cdot 10^{23}},\ \text{г},$$

где V_k – объем воды I контура.

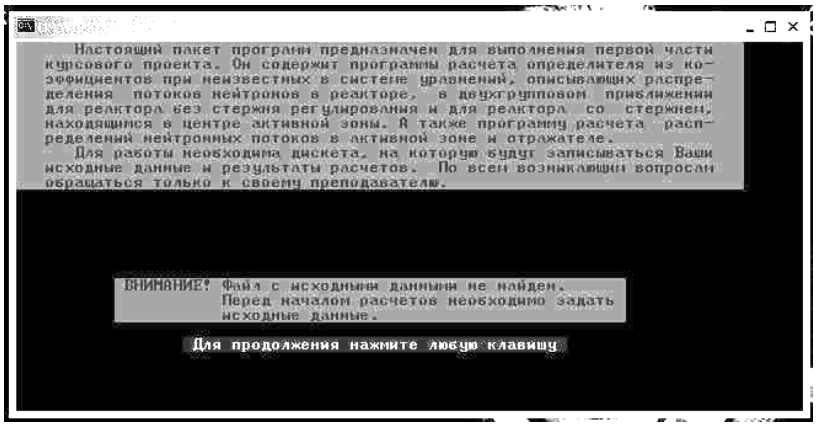
Масса борной кислоты, содержащей $m_в$ граммов бора, определяется из соотношения:

$$\frac{m_{H_3BO_3}}{m_B} = \frac{61,83}{10,81}; \qquad m_{H_3BO_3} = 5,72\cdot m_B.$$

Масса 10%-го раствора H_3BO_3 в воде соответственно равна:

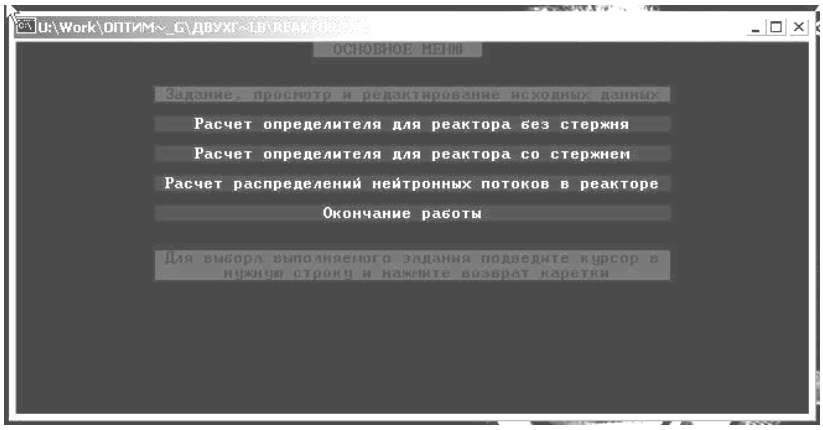
$$m_{10\%H_3BO_3} = \frac{m_{H_3BO_3}}{0,1}.$$

Для выполнения расчетов необходимо воспользоваться программой Reactor.exe, разработанной на кафедре 21 физико-технического факультета. После запуска программы загрузится следующее окно:



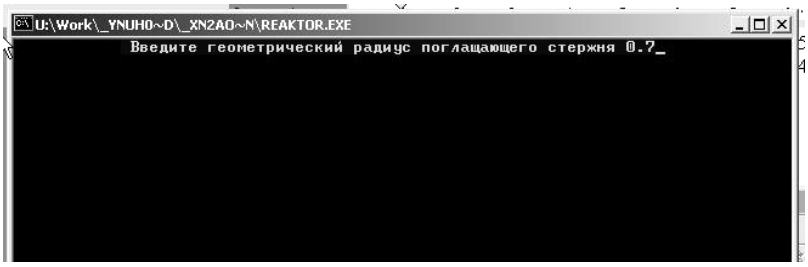
После этого необходимо нажать любую клавишу и загрузится окно для выбора действия:

1. Задание, просмотр и редактирование исходных данных.
2. Расчет определителя для реактора без стержня.
3. Расчет определителя для реактора со стержнем.
4. Расчет распределений нейтронных потоков в реакторе.

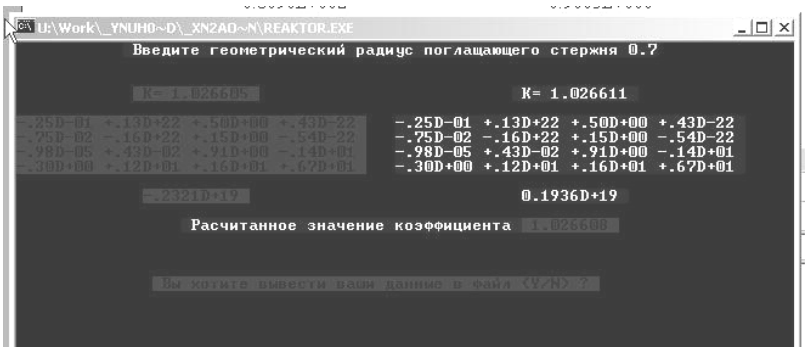


Необходимо выбрать первый пункт и ввести начальные данные в тех единицах измерения, которые указаны программой.

После задания начальных данных их следует сохранить. Начальные данные сохраняются в **корне диска U** с названием INP_DATA.dat. Далее следует выполнить расчет определителя для реактора со стержнем:



После ввода радиуса стержня, программа выполнит расчет и на экран выведет результаты:



Пример расчета

Исходные данные

Радиус активной зоны ..... 404.765 [см]
Высота активной зоны ..... 674.624 [см]
Толщина отражателя ..... 84.700 [см]
Эффективная добавка за счет отражателя ..... 57.960 [см]
Коэффициент диффузии в АЗ для БН 1.203
Коэффициент диффузии в АЗ для ТН 0.781
Коэффициент диффузии в отражателе для БН 1.118
Коэффициент диффузии в отражателе для ТН 0.900
Вероятность избежать резонансного захвата 0.833
Возраст нейтронов в активной зоне ..... 432.000 [см^2]
Возраст нейтронов в отражателе ..... 352.000 [см^2]
Квадрат длины диффузии в активной зоне ..... 100.000 [см^2]
Квадрат длины диффузии в отражателе ..... 2756.250 [см^2]
Радиус стержня.....0.7 [см]

Выходные данные программы со стержнем

K = 1.026605

–0.2522E-001	0.1293E+022	0.5043E+000	0.4310E-022
–0.7453E-002	–0.1624E+022	0.1491E+000	–0.5414E-022
–0.9843E-005	0.4338E-002	0.9095E+000	–0.1415E+001
–0.2955E+000	0.1248E+001	0.1579E+001	0.6689E+001

Значение определителя ..... –2.3214E+018

K = 1.026611

–0.2547E-001	0.1293E+022	0.5043E+000	0.4310E-022
–0.7528E-002	–0.1624E+022	0.1490E+000	–0.5414E-022
–0.9847E-005	0.4339E-002	0.9095E+000	–0.1415E+001
–0.2955E+000	0.1248E+001	0.1579E+001	0.6689E+001

Значение определителя ..... 1.9357E+018
Рассчитанное значение коэффициента ... 1.026608

Используя полученные данные в результате расчета необходимо определить общее количество стержней, их компенсирующую способность, а также выбрать тип выгорающего поглотителя.

5. ПАРАМЕТРЫ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА

5.1. Расчет потоков быстрых и тепловых нейтронов на поверхности активной зоны

Случай 1. Быстрые нейтроны

Средняя удельная мощность источников нейтронов деления равна [16]:

$$S_\nu = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10}}{V_{а.з.}} N \cdot \nu,\ см^{-3} \cdot с^{-1}, \tag{5.1}$$

где $\nu = 2{,}5$; $V_{а.з}$ – объем активной зоны, см^3; N – мощность активной зоны, Вт.

Для нейтронов с энергией больше некоторого определенного значения E средняя удельная мощность источников в активной зоне равна

$$S_\nu(E) = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10}}{V_{а.з.}} N \cdot \nu \int_E^\infty S(E)dE,\ см^{-3} \cdot с^{-1}. \tag{5.2}$$

Для описания энергетического спектра нейтронов, возникающих при делении нуклида ^{235}U, предложен ряд формул [16]. Наилучшее согласие с результатами измерений спектра в интервале энергий от 0,18 до 12,0 МэВ дает формула

$$S(E) = 0{,}453 \cdot \exp\left(-\frac{E}{0{,}965}\right) sh\sqrt{2{,}29E}, \tag{5.3}$$

где E – энергия нейтронов, МэВ.

Функция $S(E)$ нормирована на единицу, т. е.

$$\int_0^\infty S(E)dE = 1.$$

Доля нейтронов с энергией не менее E в спектре деления равна:

$$\int_E^\infty S(E)dE.$$

Ниже приведены значения $S(E)$ и интеграла $\int_E^\infty S(E)dE$ для спектра деления ^{235}U тепловыми нейтронами (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Спектр деления ^{235}U тепловыми нейтронами

E, МэВ	$S(E)$	$\int_E^{\infty} S(E)dE$
0	0	1
0,05	0,1482	0,9950
0,5	0,3470	0,8670
1,0	0,3270	0,6901
1,5	0,2977	0,5280
2,0	0,2388	0,3938
5,0	$3{,}746\cdot10^{-2}$	$5{,}124\cdot10^{-2}$
10,0	$8{,}562\cdot10^{-4}$	$1{,}058\cdot10^{-3}$
11,0	$3{,}840\cdot10^{-4}$	$4{,}686\cdot10^{-4}$

Плотность потока быстрых нейтронов на поверхности активной зоны для E = 1,5 МэВ и ν = 2,5 удовлетворительно определяется соотношением

$$\Phi_б\left(E>1{,}5\right)=2{,}02\cdot10^{10}\frac{N}{\Sigma_{а.з.}V_{а.з.}},см^{-2}\cdot с^{-1}, \tag{5.4}$$

где $\Sigma_{а.з}$ – сечение выведения быстрых нейтронов с энергией выше 1,5 Мэв в активной зоне, см$^{-1}$.

Макроскопическое сечение выведения в объеме активной зоны определяется соотношением:

$$\Sigma_{а.з.}=\sum_j N_j\sigma_{выв j},см^{-1}, \tag{5.5}$$

где N_i – ядерная концентрация j-го элемента в активной зоне, см$^{-3}$; $\sigma_{вып.j}$ – микроскопическое сечение выведения для j-го элемента, см^2.

Случай 2. Тепловые нейтроны

Поток утечки тепловых нейтронов из активной зоны равен [11]:

$$\overline{\Phi_t}=\frac{\Phi_t\Sigma_a V_{а.з.}}{S_{а.з.}}B^2L^2,\ см^{-2}\cdot с^{-1}, \tag{5.6}$$

где $\overline{\Phi_1}$ – средний поток тепловых нейтронов в активной зоне, который при мощности N(Вт) и макросечении деления горючего Σ_f равен

$$\Phi_t=\frac{3{,}1\cdot10^{10}N}{\Sigma_f V_{а.з.}},\ см^{-2}\cdot с^{-1}.$$

Σ_α – макросечение поглощения тепловых нейтронов в активной зоне, см$^{-1}$; B, L – геометрический параметр активной зоны (см$^{-1}$) и диффузионная длина, соответственно. Последние определяются нейтронно-физическим расчетом.

5.2. Ослабление нейтронного излучения в первичной защите

Случай 1. Быстрые нейтроны

Если рассматривать активную зону как источник мононаправленного излучения, это позволяет рассчитать защиту «с запасом» и упростить вычисления. В этом случае закон ослабления группы быстрых нейтронов имеет вид [11]:

$$\Phi_б(x) = \Phi_б(0) e^{-\frac{x}{\lambda}} \left(\frac{R_0}{R_0 + x} \right)^{\alpha}, \; см^{-2} \cdot c^{-1}, \tag{5.7}$$

где $\Phi_б(x)$ – плотность потока быстрых нейтронов на глубине x в защите; $\Phi_б(0)$ – плотность потока быстрых нейтронов при входе в защитный слой; λ – длина релаксации нейтронов, см; $\left(\frac{R_0}{R_0 + x} \right)^{\alpha}$ – геометрический фактор ослабления, учет которого имеет смысл, когда размеры защиты (толщина) соизмеримы с размерами активной зоны (например, ВВЭР); R_0 – внутренний радиус кривизны защитного слоя; α – показатель геометрии источника (геометрический фактор), равный:

$a = 0$ – в случае плоского источника бесконечных размеров,

$a = 1$ – «бесконечного» цилиндра,

$a = 2$ – сферы.

Случай 2. Тепловые нейтроны

Так как пробеги тепловых нейтронов относительно невелики, то геометрическим фактором в этом случае можно пренебречь. Тогда поток тепловых нейтронов в защите можно определить по формуле [11]:

$$\Phi_t(x) = \Phi_t(0) e^{-\frac{x}{L}} + \Phi_б(0) \left[\lambda \Sigma_a \left(1 - \frac{L^2}{\lambda^2} \right) \right]^{-1} \left(e^{-\frac{x}{\lambda}} - e^{-\frac{x}{L}} \right). \tag{5.8}$$

В целом, упрощенная картина ослабления нейтронов в защите такова, что быстрые, замедляясь, переходят в тепловую группу. Нейтроны же тепловой группы, «подпитываемые» замедляющимися быстрыми, поглощаются.

5.3. Расчет мощности дозы нейтронного излучения

Обычно определяют мощность дозы, создаваемой нейтронами за защитой, либо сравнивают найденные плотности потоков (быстрых и тепловых) нейтронов с допустимыми.

Мощность дозы, обусловленная быстрыми нейтронами на внешней поверхности бетона первичной защиты, определяется по формуле [6]

$$P_б = \Phi_б(>E)\beta_{бет},\ \text{мбэр/ч}, \qquad (5.9)$$

где $\Phi_б(>E)$ – плотность потока быстрых нейтронов за защитой, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; $\beta_{бет} = 0{,}135\ \frac{мбэр/ч}{1/см^2\cdot с^{-1}}$ – дозовый коэффициент.

Мощность дозы, обусловленная тепловыми нейтронами [6, 11]:

$$P_t = 8{,}2\cdot 10^{-10}\Phi_t;\ 1\ бэр/с = 2{,}95\cdot 10^{-4}\Phi_t,\ \text{мбэр/ч}, \qquad (5.10)$$

где Φ_t – плотность потока тепловых нейтронов за защитой, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Допустимая плотность потока быстрых нейтронов за защитой равна [11]

$$\Phi_{б,доп} = 2\,н/(см^2\cdot с).$$

Допустимая плотность потока тепловых нейтронов за защитой равна

$$\Phi_{t,доп} = 20\,н/(см^2\cdot с).$$

Результаты расчётов по ослаблению нейтронов в защите представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Результаты расчетов по ослаблению нейтронов в защите

Нейтроны	Плотность потока нейтронов	Плотность потока нейтронов за слоем защиты					Мощность дозы, мбэр/ч
		1	2	3	4	5	
Быстрые	$\Phi_б(0)$						
Тепловые	$\Phi_t(0)$						

5.4. Расчет мощности гамма-излучения активной зоны (первичное гамма-излучение)

Интенсивность источников гамма-излучения в активной зоне работающего реактора складывается из следующих составляющих:

- мгновенное гамма-излучение деления,
- гамма-излучение осколков деления;
- захватное гамма-излучение активной зоны.

Энергетический спектр этих источников широк и лежит в интервале от 0,1 до 10 МэВ. При этом в области высоких энергий (5÷10 МэВ) он определяется захватным гамма-излучением. В энергетическом реакторе другие источники гамма-излучения могут не учитываться. Энергетические спектры мгновенного гамма-излучения и гамма-излучения осколков деления при работе реактора практически совпадают и их суммарная энергия на одно деление составляет 15 МэВ. Нормированный на это значение равновесный энергетический спектр гамма-излучения и осколков деления описывается формулой [16]

$$S_{дел}(E) = 16{,}5e^{-1{,}1E}.$$

В проектных расчетах непрерывный энергетический спектр аппроксимируют суперпозицией моноэнергетических источников. Таким образом, весь диапазон энергий гамма-излучения разбивается на отдельные группы с интервалом ΔE_i и средней энергией $\overline{E_i}$ (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Спектр мгновенного гамма-излучения и осколков деления для ^{235}U

Энергия гамма-излучения	Интервал энергий, МэВ				
	0÷1	1÷3	3÷5	5÷7	>7
Выход мгновенного гамма-излучения, МэВ/дел	2,5	3,81	1,0	0,28	0,025
Выход гамма-излучения осколков, МэВ/дел	4,7	2,56	–	–	–
Суммарный выход, МэВ/дел	7,2	6,37	1,0	0,28	0,025

Средняя удельная мощность источников гамма-излучения (МэВ/см^{2}с) деления осколков деления с энергией от E_1 до E_2 в активной зоне работающего реактора вычисляется по формуле [16, 17]

$$q_{дел}(E_1 \geq E \geq E_2) = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10} N}{V_{а.з.}} \int_{E_1}^{E_2} S_{дел}(E)dE, \ \text{МэВ/(см}^2\cdot\text{с)}, \qquad (5.11)$$

где $\int_{E_1}^{E_2} S_{дел}(E)dE$ – выход энергии гамма-излучения на одно деление в интервале от E_1 до E_2.

Мощность источников гамма-излучения деления (мгновенного и осколков деления) резко падает с увеличением энергии. Поэтому определяющий вклад в гамма-излучение из активной зоны в области энергий более 3 МэВ вносит третий вид гамма-излучения – захватное (табл. 5.4). Для приближенной оценки источников захватного гамма-излучения из активной зоны реактора на тепловых нейтронах можно использовать выражение

$$\bar{q}_{зах}\left(E_1 \le E \le E_2\right) = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10} N}{Vaз} \sum_j \frac{\Sigma_j\left(n,\gamma\right)}{\Sigma_f^5} \int_{E_1}^{E_2} S_{зах}^j\left(E\right) dE, \ \text{МэВ/(см}^2 \cdot \text{с)}, \quad (5.12)$$

где $\Sigma_1(n\gamma)$ – макроскопическое сечение радиационного захвата теплового нейтрона на ядрах *j*-го элемента, см $^{-1}$; Σ_f^5 – макросечение деления ^{235}U, см$^{-1}$; $\int_{E_1}^{E_2} S_{зах}^j(E)dE$ – выход энергии захватного гамма-излучения в интервале $E_1 \le E \le E_2$ при захвате *j*-го элемента, МэВ/(см^3·с).

Таблица 5.4

Спектр гамма-излучения при радиационном захвате тепловых нейтронов в некоторых материалах

Ядро	$\sigma(n\gamma)$, барн	Интервалы энергий, МэВ					$E_{\max}$, МэВ
		0÷1	1÷3	3÷5	5÷7	>7	
H	0,335	0	1	0	0	0	2,23
C	0,00375	0	0	1	0	0	4,95
Na	0,47	0,96	3,14	0,7	0,31	0	6,41
Cr	3,1	0,85	0,62	0,12	0,23	0,45	9,72
Fe	2,62	0,75	0,87	0,23	0,25	0,40	10,16
Ni	4,6	0,84	0,63	0,23	0,34	0,63	9,0
Pb	0,17	0	0	0	0,07	0,93	7,38
U^{238}	2,71	2,54	2,69	0,34	0	0	4,06

Интенсивность гамма-излучения энергии E_i на поверхности активной зоны в приближении полубесконечного однородного источника определяется по формуле

$$I\left(E_i\right) = \frac{\bar{q}\left(E_i\right)}{2\mu\left(E_i\right)}\left[\frac{A\left(E_i\right)}{1+\alpha 1\left(E_i\right)} + \frac{1-A\left(E_i\right)}{1+\alpha 2\left(E_i\right)}\right], \ \text{МэВ}, \quad (5.13)$$

где $\bar{q}(E_1)$ – средняя по объёму активной зоны мощность источников гамма-изучения энергии E_i, рассчитанная по формуле (5.11) и (5.12):

$$\bar{q}\left(E_i\right) = \bar{q}_{дел}\left(E_i\right) + \bar{q}_{зах}\left(E_i\right),$$

где i – число интервалов разбиения спектра гамма-излучения. В нашем случае $i = 5$. Значение $\mu(E_i)$ – расчетный линейный коэффициент ослабления гамма-излучения энергии E_i в активной зоне; $A(E_i)$, $\alpha_1(E_i)$, $\alpha_2(E_i)$ – расчетные коэффициенты экспоненциального представления энергетического фактора накопления гамма-излучения в активной зоне [8, 12].

В результате проделанных расчетов необходимо заполнить табл. 5.5.

Таблица 5.5

Результаты расчетов гамма-излучения активной зоны (первичного гамма-излучения), падающего на защиту

ΔE_i, МэВ	$\bar{q}_{дел}$, МэВ/(см^3·с)	$\bar{q}_{зах}$, МэВ/(см^3·с)	$\bar{q}$, МэВ/(см^3·с)	$\mu(E_i)$, МэВ/(см^3·с)	$A(E_i)$	$\alpha_1(E_i)$	$\alpha_2(E_i)$	$I_{перв}(E_i)$
0÷1 1÷3 3÷5 5÷7 >7								
Суммарная интенсивность гамма-излучения								

5.5. Расчет захватного (вторичного) гамма-излучения в защите

Плотность генерации захватного гамма-излучения, рождающегося в защитных слоях, определяется пространственным распределением плотности потоков тепловых нейтронов в этих слоях. При этом удельная активность потока захватного излучения с энергией E_i на поверхности слоя защиты, генерирующего захватное гамма-излучение, вычисляется по формуле [22]

$$I_{зах}(E) = \Phi_t(0) K \sum (n\gamma) \int_{E_1}^{E_2} S_{зах}(E) dE, \text{ МэВ/(см}^2\text{·с)}. \qquad (5.14)$$

Если материал защитного слоя состоит из нескольких веществ (например, бетон), то результаты расчетов удельных интенсивностей захватных квантов энергии E_i приходится суммировать по числу компонентов j:

$$I_{зах}(E_i) = \sum_j \Phi_t(0) \Sigma_j(n\gamma) K \int_{E_1}^{E_2} S^j_{зах}(E) dE, \text{ МэВ/(см}^2\text{·с)}. \qquad (5.15)$$

В формулах (5.14), (5.15) использованы следующие обозначения: $\Phi_t(0)$ – плотность потока тепловых нейтронов при входе в слой, (см$^{-2}$·с); $\Sigma(n\gamma)$ или $\Sigma_j(n\gamma)$ – макроскопическое сечение радиационного захвата нейтронов в чистом веществе j; $\int_{E_1}^{E_2} S^j_{зах}(E) dE$ – выход захватного излучения энергии E_i при захвате ядром j-го элемента в соответствующем энергетическом интервале; K – функция, учитывающая форму распределения плотности потока тепловых нейтронов по толщине слоя защиты.

Случай 1. Если плотность потока нейтронов в слое изменяется по закону

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot e^{+\Sigma_a \cdot x},$$

то функция K имеет вид:

$$K = \frac{1}{2\Sigma_a}\left\{\ln\left|\frac{\mu - \Sigma_a}{\mu}\right| - e^{\Sigma_a d} E_1(\mu \cdot d) + E_1\left[(\mu - \Sigma_a)d\right]\right\} - \frac{1}{2}\frac{\Sigma_\alpha}{(\mu - \Sigma_\alpha)}\left[1 - e^{-(\mu - \Sigma_\alpha)d}\right]. \quad (5.16)$$

Случай 2. Если плотность потока нейтронов в слое изменяется по закону:

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot e^{-\Sigma_a \cdot x},$$

то функция K имеет иной вид:

$$K = \frac{1}{2\Sigma_a}\left\{\ln\left|\frac{\mu - \Sigma_a}{\mu}\right| - e^{\Sigma_a d} E_1(\mu \cdot d) + E_1\left[(\mu + \Sigma_a)d\right]\right\} - \frac{1}{2}\frac{\Sigma_\alpha}{(\mu + \Sigma_\alpha)}\left[1 - e^{-(\mu - \Sigma_\alpha)d}\right]. \quad (5.17)$$

В последних формулах приняты следующие обозначения: d – толщина защитного слоя; Σ_a – макросечение поглощения нейтрона; E_1 – интегральная экспонента; μ – линейный коэффициент ослабления квантов.

Случай 3. Когда распределение плотности потока нейтронов по толщине слоя может рассматриваться как равномерное (например, тонкий слой, толщиной не более трех длин свободного пробега излучения), функция K упрощается:

$$K = \frac{1}{2\mu}\left[1 - E_2(\mu \cdot d)\right], \quad (5.18)$$

где E_2 – функция Кинга [7].

Воспользовавшись одной из формул (5.14)–(5.15), производят расчет и заполняют табл. 5.6 данных по интенсивности захватного излучения, генерируемого каждым защитным слоем.

Таблица 5.6

Интенсивность захватного гамма-излучения, генерируемого слоем защиты (указать каким)

ΔE_i, МэВ	$\Phi_t(0)$, см$^{-2}$·с$^{-1}$	$\int_{E_1}^{E_2} S^j_{зах}(E)dE$, МэВ	$I_{зах}(E_i)$, МэВ/(см^2·с)
0÷1 1÷3 3÷5 5÷7 >7			
Суммарная интенсивность			

5.6. Расчет прохождения гамма-излучения через защиту

Чтобы определить ослабление интенсивности гамма-излучения отдельно взятой энергии E_i в многослойной защите, можно использовать формулу

$$I(d,E_i)=I(0,E_i)\cdot E_1\left(\sum \mu\cdot d_i\right)\overline{B_{сл}}, \qquad (5.19)$$

где d – общая толщина защиты; $I(0,E_i)$ – интенсивность гамма-излучения энергии E_i при входе в защиту; $\mu\cdot d$ – число пробегов гамма-излучения энергии E_i в защите; E_1 – интегральная экспонента; $\overline{B_{сл}}$ – средний фактор наполнения квантов энергии E_i с учетом всех слоев защиты, который определяется по формуле

$$\overline{B_{сл}}=\frac{1}{\mu\cdot d}\sum_j\left[B_i(\mu\cdot d)\mu\cdot d_i\right], \qquad (5.20)$$

где B_i – фактор накопления рассеянных квантов отдельного слоя как функция суммарного числа пробегов квантов во всей защите; d_i – толщина отдельного слоя.

Результат расчета по формуле 5.19 заносят в табл. 5.7

Таблица 5.7

Ослабление квантов в защитных слоях

Тип квантов и их энергия	$I(0,E_i)$, МэВ/(см^2•с)	$E_1(\mu,d)$	$B_{сл}$	$I(d,E_i)$
Первичные				
0÷1				
1÷3				
3÷5				
5÷7				
> 7				
Захватные 1 слоя				
0÷1				
1÷3				
3÷5				
и т. д.				

5.7. Расчет мощности дозы гамма-излучения за защитой

Мощность экспозиционной дозы, создаваемой гамма-излучением в воздухе, можно рассчитать по формуле

$$P = \sum_i P_i = 14 I_i \gamma_{вi}, \text{ мкР/с}, \qquad (5.21)$$

где i – индекс группы квантов энергии E_i; I_i – интенсивность группы квантов, МэВ/(см·с); $\gamma_{вi}$ – линейный коэффициент преобразования энергии квантов в воздухе, $см^{-1}$ (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Линейные коэффициенты преобразования энергии квантов в воздухе

ΔE_i, Мэв	0–1	1–3	3–5	5–7	>7
$\gamma \cdot 10^{-3}$, $см^{-1}$	0,0387	0,0303	0,0239	0,0211	0,0203

Примечание. Каждая из групп квантов должна включать кванты всех типов – как первичных, так и вторичных.

Воспользовавшись данными табл. 5.7 и 5.8, по формуле (5.21) определяют мощности доз гамма-излучения всех энергий за защитой. Данные заносятся в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения за защитой

ΔE_i, МэВ	Расчетные интенсивности за слоями защиты					Мощность дозы, МкР/с
	1	2	3	4	5	
0÷1 1÷3 3÷5 5÷7 > 7						
Суммарная мощность экспозиционной дозы						

В конце расчётов сравнивают расчетную мощность экспозиционной дозы по гамма-излучению с допустимой, равной 0,7 мР/ч.

В случае превышения расчетной мощности дозы над допустимой или её значимой малости требуется провести оптимизацию, изменяя толщину слоев защиты, добавляя новые слои, заменяя дорогостоящие вещества на более дешевые и т. д. При этом следует учитывать температурные условия работы защитных материалов и недопустимость в них радиационных повреждений (особенно в корпусе ВВЭР). В правильно

сконструированной защите вклад в суммарную мощность дозы за защитой от нейтронов и гамма-излучения примерно одинаков, температура бетона не превышает допустимую, а корпус реактора надежно защищен от недопустимых тепловыделений и радиационных повреждений.

5.8. Расчет радиационной защиты корпуса реактора

Функциональное назначение радиационной защиты корпуса – обеспечение его заданного радиационного ресурса. Радиационный ресурс определяется допустимым флюенсом нейтронов за весь срок службы корпуса.

Для ВВЭР радиационное повреждение корпуса обусловливается нейтронами с энергией 0,5 МэВ и проявляются в охрупчивании стенок (повышение температуры хладноломкости).

При известном допустимом флюенсе и спектре нейтронов радиационный ресурс корпуса равен

$$T_{рес} = \frac{F_{доп}}{\Phi_{корп} \cdot K_{и.м} \cdot 3{,}6 \cdot 10^3}, \text{ ч}, \qquad (5.22)$$

где $\Phi_{корп}$ – плотность потока нейтронов, падающих на корпус при работе реактора на номинальной мощности ($см^{-2} \cdot с^{-1}$); $F_{доп}$ – допустимый флюенс нейтронов ($см^{-2}$); $K_{и.м}$ – коэффициент использования мощности реактора.

Соотношение (5.22) определяет требуемую плотность потока нейтронов, падающих на корпус реактора, для заданного режима.

Для низколегированных сталей типа 48ТС и 15Х2НФА, используемых при изготовлении корпусов реакторов ВВЭР, допустимый флюенс нейтронов с энергией не менее 0,5 МэВ установлен равным $3 \cdot 10^{11}$ $см^{-2}$.

При этом условии плотность потока нейтронов с энергией более 0,5 МэВ на корпус реактора не должна превышать значения, определяемого из соотношения (5.22), т. е.

$$\Phi_{корп} = \frac{3 \cdot 10^{20}}{K_{и.м} T_{рес} 3{,}6 \cdot 10^3}, см^{-2} \cdot с^{-1}. \qquad (5.23)$$

Так, для назначенного срока службы 30 лет плотность потока нейтронов с энергией более 0,5 МэВ не должна быть выше

$$\Phi_{корп}^{доп} = 4 \cdot 10^{11}, см^{-2} \cdot с^{-1};$$

и для срока службы 40 лет –

$$\Phi_{корп}^{доп} = 3 \cdot 10^{11}, см^{-2} \cdot с^{-1}.$$

Таким образом, требуемая эффективность радиационной защиты определяется для данного срока службы корпуса условием уменьшения плотности потока нейтронов с энергией более 0,5 МэВ до допустимого значения.

Расчет требуемой толщины и состава металловодной защиты обычно проводится методом последовательных приближений. Сначала определяется необходимая толщина радиационной защиты, измеряемая в длинах релаксации быстрых нейтронов по формуле

$$d_{р.з} = \frac{\sum d_{H_2O} \cdot \gamma_{H_2O}}{6{,}5} + \frac{\sum d_{ст}}{8},$$

где $\sum d_{H_2O}$ – суммарная толщина водных слоев между активной зоной и корпусом реактора, см; γ_{H_2O} – относительная плотность воды при рабочих температуре и давлении; $\sum d_{ст}$ – суммарная толщина стальных экранов между активной зоной и корпусом.

Первое приближение для требуемой толщины радиационной защиты находится из решения трансцендентного уравнения

$$\Phi_{корп}\left(E > 0{,}5 Мэв\right) = B_н \Phi_{бн}^{а.з} E_2\left(d_{р.з}\right), \qquad (5.24)$$

где $\Phi_{корп}$ – плотность потока нейтронов на корпусе; $\Phi_{бн}^{аз}$ – плотность потока быстрых нейтронов, имеющих энергию выше некоторого порога, падающих на радиационную защиту; $E_2\left(d_{р.з}\right)$ – функция Кинга для толщины радиационной защиты, равной $d_{р.з}$; $B_н$ – фактор накопления подпороговых нейтронов с энергией более 0,5 МэВ. Порог может быть равным 1,5 МэВ, 2,0 МэВ; 3,0 МэВ…

Фактор накопления $B_н$ зависит от энергетического спектра нейтронов в области энергий больше 0,5 МэВ, формирующегося в радиационной защите данного состава. Величина его может быть определена следующим образом:

а) для нахождения $B_н$ рекомендованы программы, приводимые в работе [22];

б) если толщина воды непосредственно перед корпусом составляет от 1,0 см до 4,0 см, то $B_н$ можно определить по формуле:

$$B_н = 6{,}5 - 1{,}2 d_{H_2O}. \qquad (5.25)$$

В частном случае, когда в качестве радиационной защиты выбирается композиция с известным равновесным спектром нейтронов, фактор накопления $B_н$ можно определить через относительные величины плотности потоков нейтронов

$$B_н = \frac{\Phi\left(E > 0.5\right) \text{ отн.ед.}}{\Phi\left(E > E_{пор}\right) \text{ отн.ед.}}. \qquad (5.26)$$

Плотности потоков нейтронов в относительных единицах находятся по таблицам, например по табл. 5.10.

Таблица 5.10

Равновесный спектр нейтронов за железоводной защитой (70 % стали)

Группа нейтронов	1	2	3	4	5	6	7
Энергия, МэВ	более 0,5 МэВ	1,5÷0,94 МэВ	0,94÷0,45 МэВ	0,45÷0,003 МэВ	3000÷33 эВ	33÷0,3 эВ	0,3÷0,025 эВ
Ф, отн.ед.	1.0	0.78	1.86	5.28	2.45	4.10	3.30

Следуя данным табл. 5.10, фактор накопления нейтронов с энергией более 0,5 МэВ для ЖВЗ (70 % стали) равен 3,64.

5.9. Расчет радиационно-стимулированного тепловыделения в защите

Случай 1. Радиационностимулированное тепловыделение в корпусе реактора

Помимо защиты от радиационных повреждений корпус реактора должен быть также надежно защищен от радиационностимулированных тепловыделений. Функцию тепловой защиты корпуса выполняют специальные экраны, суммарная толщина которых должна быть достаточной для ослабления гамма-излучения активной зоны. Граничным значением безопасного тепловыделения в корпусе ВВЭР считают 0,1 Вт·см^3. Плотность источников радиационного тепловыделения, обусловленного поглощением энергии излучения в материалах защиты и оборудования, можно представить в виде суммы трех компонент:

$$q_{корп} = q_{упр} + q_{захв} + q_{\gamma} \le 0{,}1, \ \text{Вт·см}^{-3}. \qquad (5.27)$$

Тепловыделение от замедляющихся нейтронов находится по формуле

$$q_{упр} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \frac{\Phi_{б} E_{ср}}{L_{зам}}, \ \text{Вт·см}^{-3}, \qquad (5.28)$$

где $E_{ср}$= 15 МэВ; $L_{\text{зам}}$ = 15 см – длина замедления в железе; $L_{\text{зам}}=\sqrt{\tau}$; r – возраст нейтронов.

Тепловыделение от захватного взаимодействия тепловых нейтронов с материалом защиты

$$q_{захв} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot \Delta\Phi_{t} E_{св} \mu_{a}, \quad Вт \cdot см^{-3}, \qquad (5.29)$$

где $\Delta\Phi_{t}$ – поглощенная часть плотности потока нейтронов; $E_{св}$ – энергия связи нейтронов в ядрах защитного материала. Для железа $E_{\text{св}}$= 7 МэВ. μ_{a} – коэффициент истинного поглощения квантов энергии E=$E_{св}$.

Гамма-составляющую тепловыделения определяют по формуле

$$q_\gamma = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot \sum \mu_a(E_i)\left[I_{перв}(E_i) + I_{втор}(E_i)\right]B_E(E_i),\ \text{Вт·см}^{-3}, \qquad (5.30)$$

где $B_E(E_i)$ – энергетический фактор накопления квантов энергии E_i; $\mu_a(E_i)$ – коэффициенты истинного поглощения квантов энергии E_i.

Случай 2. Радиационный разогрев бетона в основном обусловлен поглощением нейтронов тепловых энергий и гамма-излучения. Удельное энерговыделение определяется по формуле

$$q_{бет} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot \left[\Delta\Phi_t E_{св} + \sum_i \Delta I^*(E_i)\right],\ \text{Вт·см}^{-3}, \qquad (5.31)$$

где $\Delta\Phi_t$ – поглощенная в бетоне часть плотности потока тепловых нейтронов,см$^{-2}$·с$^{-1}$; $E_{св}$ – энергия связи, освобождающаяся в бетоне при захвате нейтрона, МэВ; $\Delta I^*(E_i)$ – интенсивность гамма-излучения энергии E_i поглощенная в бетоне с учетом накопления, МэВ /(см ·с).

Интегральную величину тепловыделения в защите можно определить интегрированием

$$Q = \int_{V_{зам}} q(r)dV\,. \qquad (5.32)$$

5.10. Определение температуры радиационного разогрева бетона

Распределение температуры в плоском бесконечном слое защиты от радиационного тепловыделения определяется решением уравнения теплопроводности:

$$-\lambda\left[\frac{d^2T(x)}{dx^2}\right] = q(x), \qquad (5.33)$$

где $T(x)$ – распределение температуры по толщине защиты; λ – коэффициент теплопроводности (для обычного бетона $\lambda_{бет}$= 0,6 Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$; $q(x)$ – распределение источников тепловыделения.

Для уравнения (5.33) принимаются следующие граничные условия:

$$\begin{cases} T(x) = T_0 & при\ \ x = 0 \\ \dfrac{dT(x)}{dx} = 0 & при\ \ x = 0. \end{cases} \qquad (5.34)$$

Решение уравнения (5.33) при граничных условиях (5.34) для экспоненциального распределения тепловыделения

$$q(x) = q_0 e^{-kx} \qquad (5.35)$$

имеет вид

$$T(x) = T(0) + \frac{q_0}{\lambda \cdot k^2}\left(1 - e^{-kx}\right), \tag{5.36}$$

где k – коэффициент, учитывающий спад тепловыделения по толщине бетона. В обычном бетоне k = 0,06 см$^{-1}$.

Максимальный перепад температуры по толщине защиты составит

$$\Delta T_{\max} = \frac{q_0}{\lambda k^2}. \tag{5.37}$$

Распределение градиента температур по толщине защиты определяется производной

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{q_0}{\lambda k} e^{-kx}. \tag{5.38}$$

Максимальный градиент наблюдается в точке $x=0$ и равен $\frac{q_0}{\lambda k}$. Результаты расчета температурных условий эксплуатации бетонной защиты при различных интенсивностях радиационного тепловыделения сводятся в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Температурные условия эксплуатации бетонной защиты

Параметр	Тепловыделение q, Вт·см$^{-3}$			
	$1\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-4}$
ΔT_{max}, °C				
$\left(\frac{dT(x)}{dx}\right)_{max}$, °C·м$^{-1}$				

5.11. Расчет активности теплоносителя первого контура

Различают собственную и примесную радиоактивность теплоносителя первого контура.

Собственная активность обусловливается активацией ядер, входящих в состав теплоносителя. Некоторые характеристики изотопов, определяющих собственную активность воды и натрия представлены в табл. 5.12.

Для расчета собственной активности теплоносителя первого контура должны быть определены следующие исходные данные:

а) ядерные свойства активируемых изотопов и продуктов реакции;
б) распределение потоков нейтронов в объеме теплоносителя;
в) характеристики циркуляционного тракта теплоносителя (объем теплоносителя, скорость и период его циркуляции в контуре).

Реакции образования изотопов ^{16}N, ^{17}N, ^{22}Na носят пороговый характер и происходят в областях высоких энергий нейтронов.

Таблица 5.12

Характеристики изотопов, определяющие собственную активность теплоносителя

Материнский изотоп	Содержание изотопа в природной смеси, %	Реакция активации	Продукт активации	Период полураспада	Энергия активации ионного излучения, МэВ	Выход излучения на распад
^{16}O	99,8	(n, p)	^{16}N	7,35 с	6,13(γ)	0,76 (γ)
					7,1(γ)	0,06(γ)
^{17}O	0,039	(n, p)	^{17}N	4,1 с	1(n)	0,9(n)
^{23}Na	100	(n, γ)	^{24}Na	15,4ч	1,38(γ)	1.0(γ)
					2,76(γ)	1,0(γ)
^{23}Na	100	(n, 2n)	^{22}Na	2,6 лет	1,26(γ)	1.0(γ)

В ВТГР с гелиевым теплоносителем собственная активность теплоносителя определяется тритием ^{3}H, образующегося в результате реакции ^{3}He (n,p) ^{3}H. Период полураспада трития равен 12,26 лет. При распаде испускаются бета-частицы с энергией E = 0,0186 МэВ. Содержание изотопа He в естественной смеси составляют $1{,}3\cdot10^{-4}$ %. Сечение (n,p) реакции на ^{3}He равно 5400 барн.

Изменение во времени концентрации радиоактивных ядер в единице объема теплоносителя, находящегося в нейтронном потоке, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dN(t)}{dt} = N_0(t)\int\sigma_{акт}(E)\Phi(E)dE - \lambda N(t); \\ \dfrac{dN_0(t)}{dt} = -N_0(t)\int\sigma_{акт}(E)\Phi(E)dE, \end{cases} \tag{5.39}$$

где $N(t)$ – концентрация радиоактивных ядер; $N_0(t)$ – концентрация материнских ядер; $\Phi(E)$ – энергетическая зависимость плотности потока нейтронов в зоне активации; $\sigma_{акт}(E)$ – сечений активации для энергии E; λ – постоянная распада радиоактивного изотопа.

Интеграл активации для пороговых реакций типа (n,p), (n,2n) можно записать в виде

$$\int\sigma_{акт}(E)\Phi(E)dE = \overline{\sigma_{акт}(E > E_{пор})}\Phi(E > E_{пор}), \tag{5.40}$$

где $\overline{\sigma_{акт}\left(E > E_{пор}\right)}$ – усредненное сечение активации в области энергий больше $E_{пор}$.

В случае упрощенной схемы циркуляции для расчета собственной активности теплоносителя должны быть заданы следующие исходные данные:

$t_{а.з.}$ – время прохождения теплоносителя через активную зону;

T – период циркуляции теплоносителя по контуру;

$\overline{\Phi_{а.з.}(E)}dE$ – усредненная по объему активной зоны энергетическая зависимость плотности потока тепловых нейтронов.

Равновесная удельная активность теплоносителя на выходе из активной зоны для рассчитываемой схемы циркуляции, получаемая на основе решения системы уравнений (5.39) выражается следующей формулой:

$$Q_{вых}^{а.з} = \frac{\lambda N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE}{\lambda + \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE} \cdot \frac{1-\exp\left[-\left(\lambda + \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE\right)t_{а.з}\right]}{1-\exp\left[-\left(\lambda + \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE\right)T\right]}. \quad (5.41)$$

При $\lambda >> \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з.}(E)}dE$ последнее соотношение записывается в более простой форме

$$Q_{вых}^{а.з} = N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}(E)}dE \cdot \frac{1-e^{-\lambda t_{а.з}}}{1-e^{-\lambda T}}. \quad (5.42)$$

Для радиоактивных ядер, период полураспада которых много больше периода циркуляции $T_{1/2} > T_ц$, равновесная активность теплоносителя на выходе из активной зоны сводится к простейшему уравнению

$$Q_{вых}^{а.з} = N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE \frac{t_{а.з}}{T_ц}. \quad (5.43)$$

Если учесть, что $t_{а.з} = \frac{V_{а.з}}{G}$; $T_ц = \frac{V_{1k}}{G}$; G – объемный расход теплоносителя в 1-м контуре; $V_{а.з.}$ – объем теплоносителя в активной зоне; $V_{1к.}$ – полный объем теплоносителя в контуре, то (5.43) принимает вид

$$Q_{вых}^{а.з} = N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE \frac{V_{а.з}}{V_{1k}}. \quad (5.44)$$

С учетом изложенного, для оценки удельной активности теплоносителя ВВЭР по изотопам ^{16}N и ^{17}N для простейшей схемы циркуляции можно рекомендовать следующую формулу:

$$Q(t_k) = N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE \cdot \frac{1-e^{-\lambda t_{а.з.}}}{1-e^{-\lambda T_ц}} e^{-\lambda t_k}, \quad (5.45)$$

где t_k – время движения воды до k-го участка контура.

Соответствующая формула расчета удельной активности натриевого теплоносителя по изотопам ^{22}Na и ^{24}Na, учитывающая время работы реактора на мощности, имеет вид

$$Q(T_p) = N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE \frac{V_{а.з}}{V_{1k}}(1 - e^{-\lambda T_p}), \qquad (5.46)$$

где $T_р$ – время работы реактора.

Выражения (5.45, 5.46) дают предварительную оценку собственной активности теплоносителя, так как получены для идеализированной схемы циркуляции теплоносителя и не учитывают активацию вне объема активной зоны.

Собственная активность теплоносителя является определяющей при работе реактора на мощности. После остановки реактора излучение из теплоносителя определяется активностью примесей и продуктов коррозии, а также радиоактивными продуктами деления.

Концентрация примесей и продуктов коррозии в теплоносителе зависит от эффективности системы очистки первого контура. Эффективность системы очистки теплоносителя количественно измеряется постоянной очистки $\lambda_{оч}$, определяемой выражением:

$$\lambda_{оч} = \frac{\varepsilon_{оч} G_{оч}}{V_{1k}}, \qquad (5.47)$$

где $G_{оч}$ – объемный расход теплоносителя в систему очистки; V_{1k} – объем теплоносителя первого контура; $\varepsilon_{оч}$ – относительная эффективность очистки, равная

$$\varepsilon_{оч} = \frac{N_{вх}}{N_{вых}},$$

где $N_{вх}$ – концентрация примесей и продуктов деления в теплоносителе на входе в систему очистки; $N_{вых}$ – концентрация на выходе из системы очистки.

Для растворимых примесей удельную активность теплоносителя можно рассчитать с использованием методики определения собственной активности. При этом в балансе радиоактивных ядер должен быть учтен эффект системы очистки, измеряемый постоянной очистки $\lambda_{оч}$. Учет очистки теплоносителя осуществляется путем добавления к постоянной радиоактивного распада величины, равной постоянной очистки $\lambda_{оч}$.

Как известно, эффект очистки будет существен, если $\lambda_{оч}$ сравнима или больше постоянной радиоактивного распада. При $\lambda > \lambda_{оч}$ влиянием очистки на активность примесей можно пренебречь. Характеристики изотопов, определяющих примесную активность воды, натрия и гелия, представлены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Характеристики изотопов, определяющих примесную активность теплоносителя реакторных установок

Материнский изотоп	Содержание в природном элементе, %	Сечение и тип реакции активации, барн	Продукт реакции	Период полураспада	Энергия излучения, МэВ	Выход излучения на распад
^{2}H	0,015	0,00057(n, p)	^{3}H	12,26 лет	0,0186	1 (β)
^{6}Li	7,52	945 (n, α)	^{3}H	12,26 лет	0,0186	1 (β)
^{23}Na	100	0,53 (n, γ)	^{24}Na	15,1 ч	2,76	1(γ)
					1,38	1(γ)
^{37}Cl	24,5	0,56 (n, γ)	^{38}Cl	37,7 мин	1,6	0,31(γ)
					2,15	0,47 (γ)
^{40}Ar	99,6	0,53 (n, γ)	^{41}Ar	1,86 ч	1,29	0,49 (γ)
^{41}K	6,91	1,15 (n, γ)	^{42}K	12,46 ч	1,52	0,18 (γ)

Для изотопов с периодом полураспада, превышающим период циркуляции, удельную активность растворимых примесей в теплоносителе с учетом эффекта очистки после работы реактора в течение времени T_p можно оценить по формуле:

$$Q(T_p) = N_0 \int \sigma_{акт}(E)\overline{\Phi_{а.з}}(E)dE \cdot \frac{\lambda\, t_{а.з}}{(\lambda + \lambda_{оч})T} \cdot (1 - e^{-\lambda T_p}). \qquad (5.48)$$

Расчёт первичной защиты реактора следует сопроводить рисунком её слоёв и схемой потоков излучений от слоя к слою. Защита считается оптимальной, если дозы нейтронов и гамма-излучения на её поверхности примерно одинаковы.

ВВЕДЕНИЕ 3
I. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РЕАКТОРА И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ 12
1.1. Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) 12
1.2. Реакторы с графитовым замедлителем 17
1.3. Тепловыделяющие элементы реакторов 28
1.4. Ядерно-топливные материалы 30
1.5. Материалы оболочек тепловыделяющих элементов 31
1.6. Топливные кассеты и сборки 33
1.7. Выгорающие поглотители нейтронов для компенсации избыточной реактивности 35
1.8. Биологическая защита реактора (конструкции, материалы) ..35
2. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КРИТИЧЕСКОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕАКТОРА 41
2.1. Предварительный расчёт 41
2.2. Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора ..43
2.3. Оптимизация параметров ячейки и расчет коэффициента размножения 46
2.4. Расчёт эффективного коэффициента размножения 77
2.5. Температурные эффекты реактивности 79
2.6. Многогрупповой расчёт, спектр и ценности нейтронов в активной зоне. Подготовка параметров для двухгруппового расчета 96
2.7. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов. Уточнение $\kappa_{эф}$ 101
2.8. Предварительный расчёт системы органов регулирования..105
3. ПАРАМЕТРЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ НЕЙТРОННО-ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 110
3.1. Эффекты реактивности при отравлении реактора 110
3.2. Расчеты нуклидного состава и характеристик, связанных с выгоранием топлива, образованием продуктов деления и актинидов 129
3.3. Управление мощностью реактора 143
4. РАСЧЁТ ОБЪЁМНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПО ДЛИНЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА 162
4.1. Максимальные значения величин 162
4.2. Расчёт значений q_v, q_e и q_S по высоте наиболее энергонапряжённого (центрального) ТК 164

4.3. Расчёт температурного состояния тн по длине тк 165
4.4. Расчёт коэффициентов теплоотдачи с поверхности твэл.....168
4.5. Расчёт распределения температуры в твэл 170
4.6. Распределение температуры в блоке замедлителя.....173
4.7. Распределение температуры в органах регулирования.....175
4.8. Гидравлический расчёт ТК.....177
4.9. Оценка критических тепловых потоков.....178
4.10. Оценка напряжённого состояния элементов конструкции ТК.....179
4.11. Использование вычислительной техники при выполнении курсового проекта.....180
5. ПАРАМЕТРЫ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА 207
5.1. Расчет потоков быстрых и тепловых нейтронов на поверхности активной зоны 207
5.2. Ослабление нейтронного излучения в первичной защите....209
5.3. Расчет мощности дозы нейтронного излучения 210
5.4. Расчет мощности гамма-излучения активной зоны (первичное гамма-излучение).....210
5.5. Расчет захватного (вторичного) гамма-излучения в защите 213
5.6. Расчет прохождения гамма-излучения через защиту 215
5.7. Расчет мощности дозы гамма-излучения за защитой.....216
5.8. Расчет радиационной защиты корпуса реактора 217
5.9. Расчет радиационностимулированного тепловыделения в защите 219
5.10. Определение температуры радиационного разогрева бетона 220
5.11. Расчет активности теплоносителя первого контура 221

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Уран-графитовый реактор с водяным теплоносителем

Варианты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обогащение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	1500	двуокись урана	1,5	90/190	алюминий
2	1500	двуокись урана	2,5	90/190	цирконий
3	3140	двуокись урана	2,0	250/284	сплав: цирконий (99 %) ниобий (1 %)
4	1750	легированный уран	2,4	300/335	сталь IXI8H9T
5	1200	легированный уран	1,9	180/260	циркалой-2
6	800	легированный уран	3,3	190/275	сталь IXI8H9T
7	2400	двуокись урана	2,5	180/300	сталь IXI8H9T
8	2000	двуокись урана	2,2	250/275	сталь IXI8H9T
9	1200	двуокись урана	1,0	180/300	хромникелиевая сталь
10	3000	легированный уран	2,5	180/260	цирконий

Уран-графитовый реактор с газовым теплоносителем (углекислый газ)

Варианты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обогащение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	1500	природный уран	–	150/340	цирконий
2	2000	легированный уран	2,0	250/400	сталь IXI8H9T
3	2400	легированный уран	2,5	200/386	сталь IXI8H9T
4	750	двуокись урана	3,3	318/475	сталь IXI8H9T
5	1200	двуокись урана	1,8	210/310	цирконий
6	1800	двуокись урана	3,3	150/300	цирконий

Уран-графитовый реактор с газовых теплоносителем (гелий)

Вариан-ты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обогаще-ние	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	2400	легированный уран	2,0	250/450	циркалой-2
2	800	природный уран	–	207/386	цирконий
3	1800	легированный уран	1,7	280/550	хромоникелиевая сталь
4	3000	двуокись урана	2,5	250/450	сталь IXI8H9T
5	2400	двуокись урана	1,5	280/480	сталь IXI8H9T
6	1800	двуокись урана	2	250/530	сталь IXI8H9T
7	2200	двуокись урана	3,3	300/600	сталь IXI8H9T
8	2500	двуокись урана	2,3	300/600	хромоникелиевая сталь
9	800	карбид урана	1,9	280/450	сталь IXI8H9T
10	1400	карбид урана	2,2	300/600	сталь IXI8H9T
11	3000	карбид урана	2,8	300/600	сталь IXI8H9T
12	2500	карбид урана	3,3	250/470	сталь IXI8H9T

Уран-графитовый реактор с жидкометаллическим теплоносителем (натрий)

Вариан-ты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обогащение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	1500	легированный уран	1,2	250/490	цирконий
2	1800	легированный уран	2,4	260/500	циркалой-2
3	2000	легированный уран	2,2	300/520	сталь IXI8H9T

Варианты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обогащение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
4	1600	легированный уран	2	260/500	хромоникелиевая сталь
5	1200	двуокись урана	1,4	250/490	цирконий
6	1500	двуокись урана	3,3	270/520	сталь IXI8H9T
7	1800	двуокись урана	2	300/580	хромоникелиевая сталь
8	2000	двуокись урана	2,1	250/500	сталь IXI8H9T
9	1500	карбид урана	1,6	270/510	сталь IXI8H9T
10	1200	карбид урана	1,5	260/520	циркалой-2
11	1800	карбид урана	2	300/520	сталь IXI8H9T
12	2000	карбид урана	2,1	300/580	сталь IXI8H9T

Уран-графитовый реактор
с жидкометаллическим теплоносителем (эвтектика Na – 22,8 %, K – 77,2 %)

Варианты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обогащение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	1500	легированный уран	1,2	250/490	цирконий
2	1800	легированный уран	2,4	260/500	циркалой-2
3	2000	легированный уран	2,2	300/520	сталь IXI8H9T
4	1600	легированный уран	2	260/500	хромоникелиевая сталь
5	1200	двуокись урана	1,4	250/490	цирконий
6	1500	двуокись урана	3,3	270/520	сталь IXI8H9T
7	1800	двуокись урана	2	300/580	хромоникелиевая сталь

8	2000	двуокись урана	2,1	250/500	сталь IXI8H9T
9	1500	карбид урана	1,6	270/510	сталь IXI8H9T
10	1200	карбид урана	1,5	260/520	циркалой-2
11	1800	карбид урана	2	300/520	сталь IXI8H9T
12	2000	карбид урана	2,4	300/580	сталь IXI8H9T

Уран-графитовый реактор
с жидкометаллическим теплоносителем (эвтектика Na – 56,0 %, K – 44,0 %)

Вари-анты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обога-щение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	1500	легированный уран	1,2	250/490	цирконий
2	1800	легированный уран	2,4	260/500	циркалой-2
3	2000	легированный уран	2,2	300/520	сталь IXI8H9T
4	1600	легированный уран	2	260/500	хромоникелиевая сталь
5	1200	двуокись урана	1,4	250/490	цирконий
6	1500	двуокись урана	1,5	270/520	сталь IXI8H9T
7	1800	двуокись урана	2	300/580	хромоникелиевая сталь
8	2000	двуокись урана	2,1	250/500	сталь IXI8H9T
9	1500	карбид урана	1,6	270/510	сталь IXI8H9T
10	1200	карбид урана	1,5	260/520	циркалой-2
11	1800	карбид урана	2	300/520	сталь IXI8H9T
12	2000	карбид урана	2,4	300/580	сталь IXI8H9T

Водо-водяной реактор

Вари-анты	Тепловая мощность, МВт	Ядерное горючее	Обога-щение	Входная/выходная температуры теплоносителя, °С	Материал оболочек твэлов и кассет
1	1500	легированный уран	2	250/275	алюминий
2	1200	легированный уран	3,3	260/280	цирконий
3	1800	легированный уран	2	265/300	циркалой-2
4	2000	легированный уран	2,5	252/287	сталь IXI8H9T
5	1500	легированный уран	2,7	250/280	хромоникелиевая сталь
6	1000	двуокись урана	1,8	248/278	цирконий
7	1200	двуокись урана	1,5	265/300	циркалой-2
8	1500	двуокись урана	2	260/280	сталь IXI8H9T
9	1800	двуокись урана	2,5	250/275	хромоникелиевая сталь
10	1500	двуокись урана	2,7	260/280	сталь IXI8H9T
11	2500	двуокись урана	2,2	275/300	сталь IXI8H9T
12	500	двуокись урана	2,4	180/200	сталь IXI8H9T
13	250	двуокись урана	1,4	135/208	цирконий
14	3000	двуокись урана	3,3	131/208	сплав: цирконий (99 %) ниобий (1 %)

Задание на курсовой проект по теме
«ФИЗИКА И РАСЧЕТ ЯЭУ»

1. Тип реактора: ВВЭР

2. Основные исходные данные

• тепловая мощность	1500 МВт
• ядерное горючее	UO_2
• обогащение урана	2,7 %
• теплоноситель	H_2O
• температура на входе	260 °С
• температура на выходе	280 °С
твэлы	стержневые с наружным охлаждением
• материал оболочек твэлов и кассет	сталь (1Х18Н9Т)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ
Часть 1. (пример)

1. Особенности конструкций реактора и выбор основных элементов активной зоны

На основании рекомендаций изложенных в главе 1 в данной работе взят следующий прототип реактора ВВЭР.

Активная зона реактора ВВЭР собрана из твэлов, объединенных в шестигранные кассеты. твэлы омываются снаружи водой под давлением. Диаметр твэл – 9,1 мм, материал покрытия – цирконий с добавкой 1 % ниобия. Число твэлов в кассете – 126. В кассете твэлы образуют треугольную решетку с шагом 14,3 мм. Размер ТВС «под ключ» – 144 мм. Между ТВС имеется зазор 2–3 мм.

При выборе конструкции твэл и его размеров необходимо учитывать следующие соображения:

1) чем больше отношение поверхности к объёму, тем меньше напряжённость единицы поверхности твэла;
2) с возрастанием отношения поверхности к объёму твэла уменьшаются размеры активной зоны, но одновременно возрастает доля конструкционных материалов, снижаются прочностные и вибрационные характеристики твэлов;
3) поперечные размеры твэлов должны уменьшаться с увеличением температуры теплоносителя и тепловых потоков, а также с уменьшением теплопроводности топлива;
4) конструкция и размеры твэлов существенно влияют на параметры размножающей среды и загрузку топлива в реактор.

Обычно твэл состоит из топливного сердечника, оболочки, отделяющей сердечник от теплоносителя и замедлителя, и концевых деталей, герметизирующих полость сердечника. Внутри оболочки предусматривают свободные объёмы для компенсации разности термических расширений сердечника и оболочки и для сбора газообразных продуктов деления. Для металлического урана этот зазор необходим ещё для компенсации увеличения объёма при работе. Обычно зазор не превышает (0,05–0,2) мм. Для улучшения теплопередачи зазор заполняют газами или жидкими металлами. Кроме радиального зазора, необходимо предусмотреть газовую полость, в которой накапливаются газообразные продукты деления (в основном, атомы ксенона и криптона). Эта полость может быть выполнена в виде осевого зазора, расположенного на конце твэла (за пределами активной зоны), или в виде отверстия по центру сердечника, распределенного по длине, либо в форме углублений на стыках таблеток, из которых состоит сердечник.

В качестве ядерно-топливного материала выбрано керамическое ядерное топливо (UO_2).

Двуокись урана обладает высокой температуростойкостью ($T_{пл}$ = 2800 °С) и, что особенно важно, высокой радиационной стойкостью.

Недостатком двуокиси урана является меньшая по сравнению с металлическим топливом плотность и процентное содержание урана, чрезвычайно низкая теплопроводность.

Последнее обуславливает высокие градиенты температуры в двуокиси, достигающие 400 °С на 1 мм, что в конечном итоге влияет на прочностные характеристики твэл.

Толщину оболочки выбирают, исходя из условий обеспечения достаточной прочности. Она составляет 0.2÷0.4 мм для стальных и 0.4÷0.8 мм для циркониевых и алюминиевых оболочек.

Нержавеющие стали обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью, хорошими технологическими свойствами.

Наибольшее распространение получили хромо-никелевые нержавеющие стали: OXI8H9T, 1X18H9T.

Состав стали 1X18H9T следующий: железо – 70,7 %, хром – 18 %, никель – 9 %, титан – 0,8 %, марганец – 1,5 %. Плотность стали – 7,95 г/см^3.

Нержавеющая сталь надежно и длительно работает в воде при температурах до 360÷400 °С.

Стали показали хорошую совместимость с различными видами ядерного топлива.

Несущий каркас ТВС может быть выполнен в виде центральной несущей трубы с закрепленными на ней дистанцирующими решетками. В трубе при этом могут размещаться датчики СУЗ, либо дросселирующие вставки, регулирующие расход теплоносителя в межтвэльном пространстве.

1.1. Предварительный тепловой расчет

Выбор рабочих параметров

Толщина оболочки твэла..... 0.04 см
Толщина стенки кассет..... 0.15 см
Диаметр твэла..... 0.91 см
Диаметр топливной таблетки ..... 0.753 см
Число твэлов в кассете 126
Шаг расположения твэлов (шаг решетки)..... 1.225 см
Размер кассеты «под ключ»..... 14.4 см
Зазор между кассетами..... 0.3 см

2. Предварительный расчет

Схема расчета реактора на тепловых нейтронах начинается с предварительной оценки размеров активной зоны, которые обеспечили бы нужный теплосъем при заданной мощности аппарата.

В гетерогенных реакторах максимально допустимая тепловая нагрузка $q_{\max}$ на поверхности тепловыделяющих элементов является важным параметром, который определяет размеры активной зоны при заданном шаге решетки.

Для предварительных расчетов можно вместо величины $q_{\max}$ использовать обобщенные данные для средней удельной энергетической нагрузки.

Исходя из требуемой мощности реактора, размеры активной зоны можно оценить следующим образом

$$V_{\text{а.з.}} = \frac{N}{\bar{N}_0} \text{з}\ , \text{см}^3; \tag{2.1}$$

$$D_{\text{а.з.}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{а.з.}}}{\text{р}m}}, \text{см}; \tag{2.2}$$

$$H = mD_{\text{а.з.}}, \text{ см}, \tag{2.3}$$

где $V_{\text{а.з.}}, D_{\text{а.з.}}, H$ – объем, диаметр, высота активной зоны, см; m – отношение высоты к диаметру, обычно m = 0,8÷1,0; N – заданная мощность реактора, кВт; η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора вследствие размещения регулирующих стержней.

Коэффициент отличается от единицы, если регулирующие стержни занимают отдельные ячейки реактора (η = 1,1–1,3).

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 K_V, \tag{2.4}$$

где K_V – объемный коэффициент неравномерности тепловыделения.($K_V = 2 \div 3$)

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0{,}116 \cdot \Pi_0 \cdot n}, \text{ Гкал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, \tag{2.5}$$

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного твэла, см; n – число твэлов в кассете; $S_{\text{яч}}$ – площадь сечения ячейки, см^2.

Необходимая для отвода тепла скорость определяется в максимально напряженно тепловыделяющем элементе из уравнения баланса тепла:

$$\text{н} = \frac{q_{\max}\, \Pi_0\, H_{\text{а.з.}}}{3{,}6\, K_z\, \text{г}\, \Delta i\, S}, \tag{2.6}$$

где н – скорость теплоносителя на входе, м/с; K_z – осевой коэффициент неравномерности (K_z = 1,2 – 1,5); S – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один элемент, см^2; γ – удельный вес теплоносителя при рабочих параметрах, г/см^3; Δi – разность теплосодержания теплоносителя на выходе, ккал/кг.

Если теплоемкость $C_р$ (ккал/кг·град) не зависит от температуры, то:

$$\Delta i = C_р(t_{вых} - t_{вх}). \qquad (2.7)$$

В противном случае величину теплосодержания как функцию параметров теплоносителя следует определять по специальным таблицам или графикам.

В настоящее время для воды, органических жидкостей и легких металлов можно принимать скорость до 10 м/с.

Для проведения расчета были приняты следующие величины:

Заданная тепловая мощность..... N = 1500 МВт

Среднеинтегральное значение мощности ..... $\bar{N}_0$ =75 кВт/л

Коэффициент увеличения активной зоны.....η = 1.1

Отношение высоты к диаметру ..... m = 0.85

Объемный коэффициент неравномерности .....K_V = 2.9

Осевой коэффициент неравномерности ..... K_z = 1.5

Объем активной зоны:

$$V_{а.з.} = \frac{N}{\bar{N}_0}\eta = \frac{1500 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{75 \cdot 10^3} \cdot 1{,}1 = 22 \cdot 10^6 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{а.з.} = \sqrt[3]{\frac{4V_{а.з.}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 22 \cdot 10^6}{3{,}14 \cdot 0{,}85}} = 320{,}7 \text{ см}.$$

Высота активной зоны:

$$H = m \cdot D_{а.з.} = 0{,}8 \cdot 320{,}7 = 272{,}6 \text{ см}.$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 75 \cdot 2{,}9 = 217{,}5 \text{ кВт/см}^3.$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$П_0 = р \cdot d$, где d – диаметр твэла, $П_0$=3,14·0,91=2,857 см;

так как ячейка имеет шестигранную форму, то для нахождения площади можно воспользоваться формулой:

$$S_{\text{яч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot L^2}{2},$$

где L – размер кассеты «под ключ», $S_{\text{яч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 14,4^2}{2} = 179,58$ см^2;

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot n} = \frac{217 \cdot 10^{-3} \cdot 179,58}{0,116 \cdot 2,857 \cdot 126} = 0,935 \ \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Необходимая скорость прокачки теплоносителя, т. к. при $\overline{t} = 270$ °С $\gamma = 767,9$ г/см^3 и $C_p = 1,21$ ккал/кг·град,
то $\Delta i = 1,21 \cdot (280 - 260) = 24,2$ ккал/кг

$$S = \frac{S_{яч} - n\frac{\pi \cdot d^2}{4}}{n} = \frac{179,58 - 126 \cdot \frac{\pi \cdot 0,91^2}{4}}{126} = 0,775 \text{ см}.$$

$$\nu = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{\text{а.з.}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \gamma \cdot \Delta i \cdot S} = \frac{0,935 \cdot 2,857 \cdot 272,6}{3,6 \cdot 1,5 \cdot 767,9 \cdot 10^{-3} \cdot 24,2 \cdot 0,775} = 9,36 \ \frac{м}{с}.$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям ($\nu < 10$ м/с – для воды).

Принятые в предварительном тепловом расчёте шаг решетки, размеры твэл, скорость, проходное сечение для теплоносителя, размеры реактора уточняются в результате последующего физического расчёта.

3. Физический расчет реактора

Целью физического расчета является главным образом выбор рациональной конструкции реактора и обогащение горючего с точки зрения осуществления реакции деления и удобства управления ею.

Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны (горючее, оболочки, теплоноситель, замедлитель). Температура всех элементов реактора принимается равной 20 °С.

Вычисление ядерных концентраций производят для каждого элемента активной зоны и отражателя. Ядерная концентрация находится по формуле

$$N = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \gamma}{A}, \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}, \qquad (3.1)$$

где γ – весовая концентрация элемента, A – атомный вес элемента.

Расчет концентрации топлива

Топливом является двуокись урана (UO_2), обогащенная по U^{235} на 2,7 %. поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N_{UO_2} = \gamma_{UO_2} \cdot \frac{N_A}{M_{UO_2}} = 10,2 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{270} = 2,275 \cdot 10^{22} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Расчет концентрации отдельных элементов, входящих в состав топлива, осуществляется следующим образом:

$$N_{U^5} = C_{U^5} \cdot N_{UO_2} = 0,027 \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 0,0614 \cdot 10^{22} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{U^8} = \left(1 - C_{U^5}\right) \cdot N_{UO_2} = \left(1 - 0,027\right) \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 2,2136 \cdot 10^{22} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_O = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 4,55 \cdot 10^{22} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Расчет концентрации оболочки

Состав стальной оболочки твэл следующий: железо (0,707), хром (0,18), никель (0,09), титан (0,008), марганец (0,015). Соответственно произведем расчет концентрации каждой компоненты, входящей в состав стали.

$$N_{Fe} = \gamma_{\text{сталь}} \cdot \frac{C_{Fe} \cdot N_A}{A_{Fe}} = 7,95 \cdot \frac{0,707 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{56} = 0,6045 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{Cr} = \gamma_{\text{сталь}} \cdot \frac{C_{Cr} \cdot N_A}{A_{Cr}} = 7,95 \cdot \frac{0,18 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{52} = 0,1657 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{Ni} = \gamma_{\text{сталь}} \cdot \frac{C_{Ni} \cdot N_A}{A_{Ni}} = 7,95 \cdot \frac{0,09 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{59} = 0,073 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{Ti} = \gamma_{\text{сталь}} \cdot \frac{C_{Ti} \cdot N_A}{A_{Ti}} = 7,95 \cdot \frac{0,008 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{48} = 0,00798 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{Mn} = \gamma_{\text{сталь}} \cdot \frac{C_{Mn} \cdot N_A}{A_{Mn}} = 7,95 \cdot \frac{0,015 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{55} = 1,31 \cdot 10^{21} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Расчет концентрации теплоносителя

Теплоносителем (замедлителем) в данном ядерном реакторе служит вода.

$$N_{H_2O} = \gamma_{H_2O} \cdot \frac{N_A}{A_{H_2O}} = 1 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{18} = 0,3346 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{H_2} = 2 \cdot N_{H_2O} = 2 \cdot 0{,}3346 \cdot 10^{23} = 0{,}669 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_O = 1 \cdot N_{H_2O} = 0{,}3346 \cdot 10^{23} \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Расчет микро- и макросечений для «холодного» реактора

Необходимость обработки сечений связана с тем, что их значения, приведенные в справочниках, относятся к энергии нейтронов $E = 0{,}0253$ эВ соответствующей при распределении нейтронов по спектру Максвелла наиболее вероятной скорости $\nu = 2200$ м/с.

При физико-нейтронных расчетах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Следует отметить, что максвелловский спектр тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К при энергии примерно равной $E = 0{,}2$ эВ, которая называется «энергией сшивки».

В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов (спектр сдвинут в область больших энергий).

Для удобства расчетов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру (температура нейтронного газа – $T_{\text{НГ}}$), которая превышает температуру замедлителя. Поперечные сечения поглощения и деления, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формуле:

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}}, \tag{3.2}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}}, \tag{3.3}$$

где σ_{a_0}, σ_{f_0} – табличные значения сечений; f_a, f_f – поправочный коэффициент f, учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/\nu^2$.

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50–100 °С.

Температура активной зоны в холодном реакторе с жидкометаллическим теплоносителем должна на 20÷50 °С превышать температуру плавления теплоносителя. При подсчете ядерной концентрации необходимо учитывать зависимость плотности теплоносителя от температуры.

Микроскопические сечения рассеяния практически не зависят от энергии тепловых нейтронов, поэтому непосредственно можно восполь-

зоваться для них табличными данными. Макроскопические поперечные сечения вычисляются следующим образом:

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i \text{; причем } \sigma_{tr_i} = \sigma_{a_i} + \sigma_{in_i} + \sigma_{s_i} \cdot (1 - \mu_i); \quad (3.4)$$

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению

$$\xi\Sigma_{si} = \sum_{i=1}^{m} \xi_i \cdot \Sigma_{s_i}, \quad (3.5)$$

где ξ_i – логарифмический декремент, $\xi = \dfrac{2}{A + \dfrac{2}{3}}$.

«Доли» материалов в ячейке

Радиус топливной таблетки составляет 0,3765 см.
Площадь ячейки составляет 179,58 см^2.
Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 элемент 0,775 см^2.
Площадь топливной таблетки определяется по формуле:

$$S_{\text{табл}} = \pi \cdot R^2_{\text{табл}} = 3{,}14 \cdot 0{,}3765^2 = 0{,}445 \text{ см}^2.$$

Определим доли материалов:

1. Доля топлива: $\beta_{\text{топл}} = \dfrac{n \cdot S_{\text{табл}}}{S_{\text{яч}}} = \dfrac{126 \cdot 0{,}445}{179{,}58} = 0{,}312$.
2. Доля теплоносителя: $\beta_{\text{тн}} = \dfrac{n \cdot S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \dfrac{126 \cdot 0{,}775}{179{,}58} = 0{,}544$.
3. Доля конструкционных материалов: $\beta_{\text{км}} + \beta_{\text{топл}} + \beta_{\text{тн}} = 1$, следовательно $\beta_{\text{км}} = 0{,}144$.

Расчет микро- и макросечений

Макросечения для воды

Из-за сильной химической связи между атомами водорода и кислорода в молекуле расчет макросечения для воды усложняется, поэтому принято брать экспериментальные значения:
$\Sigma_a^{H_2O} = 0{,}0221$ см$^{-1}$, $\Sigma_s^{H_2O} = 2{,}67$ см$^{-1}$, $\Sigma_{tr}^{H_2O} = 2{,}31$ см$^{-1}$, $\xi\Sigma_s^{H_2O} = 1{,}35$ см$^{-1}$.

Микро- и макросечения для U^{235}

Произведем расчет сечений для температуры нейтронного газа равной 400 К.
$f_a = 0{,}96, f_f = 0{,}96$ – поправки для U^{235} на отклонение от закона $1/v^2$.
$\sigma_{a_0} = 683$ барн – табличное сечение поглощения U^{235}.
$\sigma_{f_0} = 582$ барн – табличное сечение деления U^{235}.

Тогда, с учетом поправок, сечения для U^{235} получаем:

$$\sigma_a^{U^5} = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 496,075 \text{ барн},$$

$$\sigma_f^{U^5} = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 422,72 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{U^5} = 15 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{U^5} = 0,$$

$$\sigma_{tr}^{U^5} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_s^{U^5} \cdot \left(1 - \mu_s^{U^5}\right) = 496,08 + 15 \cdot (1 - 0) = 511,08 \text{ барн},$$

$$\xi_{U^5} = \frac{2}{A_{U^5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 0,0085,$$

$$\Sigma_a^{U^5} = \sigma_a^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 496,08 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,305 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_f^{U^5} = \sigma_f^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 422,72 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,2596 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{U^5} = \sigma_s^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,0092 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{U^5} = \sigma_{tr}^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 511,08 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,314 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{U^5} = 0,0085 \cdot 0,009 = 7,65 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для U^{238}

$$\sigma_a^{U^8} = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 2,05 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{U^8} = 9 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{U^8} = 0,$$

$$\sigma_{tr}^{U^8} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_s^{U^8} \cdot \left(1 - \mu_s^{U^8}\right) = 2,05 + 9 \cdot (1 - 0) = 11,05 \text{ барн},$$

$$\xi_{U^5} = \frac{2}{A_{U^5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 0,0084$$

$$\Sigma_a^{U^8} = \sigma_a^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 2,05 \cdot 10^{-24} \cdot 2,2136 \cdot 10^{22} = 0,0454 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{U^8} = \sigma_s^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 2,2136 \cdot 10^{22} = 0,199 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{U^8} = \sigma_{tr}^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 11,05 \cdot 10^{-24} \cdot 2,2136 \cdot 10^{22} = 0,245 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{U^8} = 0,0085 \cdot 0,199 = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для кислорода

$$\sigma_a^O = 0 \text{ барн}, \quad \sigma_s^O = 3,75 \text{ барн}, \quad \mu_s^O = 0,04,$$

$$\sigma_{tr}^O = \sigma_a^O + \sigma_s^O \cdot \left(1 - \mu_s^O\right) = 0 + 3,75 \cdot (1 - 0,04) = 3,6 \text{ барн},$$

$$\xi_O = \frac{2}{A_O + \frac{2}{3}} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0{,}12,$$

$$\Sigma_a^O = \sigma_a^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 0 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^O = \sigma_s^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 3{,}75 \cdot 10^{-24} \cdot 4{,}55 \cdot 10^{22} = 0{,}171 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^O = \sigma_{tr}^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 3{,}6 \cdot 10^{-24} \cdot 4{,}55 \cdot 10^{22} = 0{,}164 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^O = 0{,}12 \cdot 0{,}171 = 0{,}02 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для UO_2

$$\sigma_a^{UO_2} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_a^{U^8} + \sigma_a^O = 683 + 2{,}05 + 0 = 498{,}13 \text{ барн},$$

$$\sigma_f^{UO_2} = \sigma_f^{U^5} = 422{,}72 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{UO_2} = \sigma_s^{U^5} + \sigma_s^{U^8} + \sigma_s^O = 15 + 9 + 3{,}75 = 27{,}75 \text{ барн},$$

$$\sigma_{tr}^{UO_2} = \sigma_{tr}^{U^5} + \sigma_{tr}^{U^8} + \sigma_{tr}^O = 511{,}08 + 11{,}05 + 3{,}6 = 525{,}73 \text{ барн},$$

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^5} + \Sigma_a^{U^8} + \Sigma_a^O = 0{,}305 + 0{,}0454 + 0 = 0{,}3504 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^5} = 0{,}2596 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^5} + \Sigma_s^{U^8} + \Sigma_s^O = 0{,}0092 + 0{,}199 + 0{,}171 = 0{,}3792 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^5} + \Sigma_{tr}^{U^8} + \Sigma_{tr}^O = 0{,}314 + 0{,}245 + 0{,}164 = 0{,}723 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{UO_2} = \xi\Sigma_s^{U^5} + \xi\Sigma_s^{U^8} + \xi\Sigma_s^O = 0{,}0000765 + 0{,}00167 + 0{,}02 = 0{,}0217 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для железа (Fe)

$$\sigma_a^{Fe} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 2{,}53 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 1{,}91 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Fe} = 11{,}4 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Fe} = 0{,}01,$$

$$\xi_{Fe} = \frac{2}{A_{Fe} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{56 + \frac{2}{3}} = 0{,}035,$$

$$\sigma_{tr}^{Fe} = \sigma_a^{Fe} + \sigma_s^{Fe} \cdot \left(1 - \mu_s^{Fe}\right) = 1{,}91 + 11{,}4 \cdot (1 - 0{,}01) = 13{,}196 \text{ барн},$$

$$\Sigma_a^{Fe} = \sigma_a^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 1{,}91 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}6045 \cdot 10^{23} = 1{,}155 \cdot 10^{-1} = 0{,}116 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Fe} = \sigma_s^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 11{,}4 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}6045 \cdot 10^{23} = 0{,}689 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Fe} = \sigma_{tr}^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 13{,}186 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}6045 \cdot 10^{23} = 0{,}689 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Fe} = 0{,}035 \cdot 0{,}689 = 0{,}024 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для хрома (Cr)

$$\sigma_a^{Cr} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 3{,}1 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 2{,}35 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Cr} = 4{,}2 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Cr} = 0{,}01,$$

$$\sigma_{tr}^{Cr} = \sigma_a^{Cr} + \sigma_s^{Cr} \cdot \left(1 - \mu_s^{Cr}\right) = 2{,}35 + 4{,}2 \cdot (1 - 0{,}01) = 6{,}508 \text{ барн},$$

$$\xi_{Cr} = \frac{2}{A_{Cr} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{52 + \frac{2}{3}} = 0{,}038,$$

$$\Sigma_a^{Cr} = \sigma_a^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 2{,}35 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}1657 \cdot 10^{23} = 0{,}039 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Cr} = \sigma_s^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Cr} = 4{,}2 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}1657 \cdot 10^{23} = 0{,}07 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Cr} = \sigma_{tr}^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Cr} = 6{,}508 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}1657 \cdot 10^{23} = 0{,}108 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Cr} = 0{,}038 \cdot 0{,}07 = 2{,}66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для никеля (Ni)

$$\sigma_a^{Ni} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 4{,}6 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 3{,}48 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Ni} = 17 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Ni} = 0{,}01,$$

$$\sigma_{tr}^{Ni} = \sigma_a^{Ni} + \sigma_s^{Ni} \cdot \left(1 - \mu_s^{Ni}\right) = 3{,}48 + 17 \cdot (1 - 0{,}01) = 20{,}31 \text{ барн},$$

$$\xi_{Ni} = \frac{2}{A_{Ni} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{59 + \frac{2}{3}} = 0{,}0335,$$

$$\Sigma_a^{Ni} = \sigma_a^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 3{,}48 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}073 \cdot 10^{23} = 0{,}025 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Ni} = \sigma_s^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 17 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}073 \cdot 10^{23} = 0{,}124 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Ni} = \sigma_{tr}^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 20{,}31 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}073 \cdot 10^{23} = 0{,}148 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Ni} = 0{,}0335 \cdot 0{,}124 = 4{,}154 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для титана (Ti)

$$\sigma_a^{Ti} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 5{,}8 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 4{,}39 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Ti} = 4{,}2 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Ti} = 0{,}01,$$

$$\sigma_{tr}^{Ti} = \sigma_a^{Ti} + \sigma_s^{Ti} \cdot \left(1 - \mu_s^{Ti}\right) = 4{,}39 + 4{,}2 \cdot (1 - 0{,}01) = 8{,}548 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi_{Ti} = \frac{2}{A_{Ti} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{48 + \frac{2}{3}} = 0{,}041$$

$$\Sigma_a^{Ti} = \sigma_a^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 4{,}39 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}00798 \cdot 10^{23} = 3{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Ti} = \sigma_s^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 4{,}2 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}00798 \cdot 10^{23} = 3{,}35 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Ti} = \sigma_{tr}^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 8{,}548 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}00798 \cdot 10^{23} = 6{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Ti} = 0{,}041 \cdot 3{,}35 \cdot 10^{-3} = 0{,}14 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для марганца (Mn)

$$\sigma_a^{Mn} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 13{,}16 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 9{,}96 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{Mn} = 2{,}3 \text{ барн}, \quad \mu_s^{Mn} = 0{,}01, \qquad \sigma_{tr}^{Mn} = 12{,}33 \text{ барн},$$
$$\xi_{Mn} = \frac{2}{A_{Mn} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{55 + \frac{2}{3}} = 0{,}0359,$$
$$\Sigma_a^{Mn} = \sigma_a^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 9{,}96 \cdot 10^{-24} \cdot 1{,}31 \cdot 10^{21} = 0{,}013 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Mn} = \sigma_s^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 2{,}3 \cdot 10^{-24} \cdot 1{,}31 \cdot 10^{21} = 0{,}003 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Mn} = \sigma_{tr}^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 12{,}33 \cdot 10^{-24} \cdot 1{,}31 \cdot 10^{21} = 0{,}016 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Mn} = 0{,}0359 \cdot 0{,}003 = 1{,}077 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для стали

$$\sigma_a^{\text{сталь}} = \sigma_a^{Fe} + \sigma_a^{Cr} + \sigma_a^{Ni} + \sigma_a^{Ti} + \sigma_a^{Mn} = 1{,}91 + 2{,}35 + 3{,}48 + 4{,}39 + 9{,}96 = 22{,}09 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{\text{сталь}} = \sigma_s^{Fe} + \sigma_s^{Cr} + \sigma_s^{Ni} + \sigma_s^{Ti} + \sigma_s^{Mn} = 11{,}4 + 4{,}2 + 17 + 4{,}2 + 2{,}3 = 39{,}1 \text{ барн},$$
$$\sigma_{tr}^{\text{сталь}} = \sigma_{tr}^{Fe} + \sigma_{tr}^{Cr} + \sigma_{tr}^{Ni} + \sigma_{tr}^{Ti} + \sigma_{tr}^{Mn} = 13{,}196 + 6{,}508 + 20{,}31 + 8{,}548 + 12{,}33 =$$
$$= 60{,}892 \text{ барн},$$
$$\Sigma_a^{\text{сталь}} = \Sigma_a^{Fe} + \Sigma_a^{Cr} + \Sigma_a^{Ni} + \Sigma_a^{Ti} + \Sigma_a^{Mn} = 0{,}116 + 0{,}039 + 0{,}025 + 0{,}0035 + 0{,}013 =$$
$$= 0{,}1965 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{\text{сталь}} = \Sigma_s^{Fe} + \Sigma_s^{Cr} + \Sigma_s^{Ni} + \Sigma_s^{Ti} + \Sigma_s^{Mn} = 0{,}689 + 0{,}07 + 0{,}124 + 0{,}00335 + 0{,}003 = 0{,}889$$
$$\Sigma_{tr}^{\text{сталь}} = \Sigma_{tr}^{Fe} + \Sigma_{tr}^{Cr} + \Sigma_{tr}^{Ni} + \Sigma_{tr}^{Ti} + \Sigma_{tr}^{Mn} = 0{,}798 + 0{,}108 + 0{,}148 + 0{,}0068 + 0{,}016 =$$
$$= 1{,}0768 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{\text{сталь}} = \xi\Sigma_s^{Fe} + \xi\Sigma_s^{Cr} + \xi\Sigma_s^{Ni} + \xi\Sigma_s^{Ti} + \xi\Sigma_s^{Mn} = 0{,}031 \text{ см}^{-1}.$$

Все рассчитанные сечения сведем в таблицу.

Таблица 1

Исходные данные для физического расчета

Материал	A_i	γ_i	N_i	β_i	$\xi\Sigma_s$	Микросечение, барн				Макросечение, $см^{-1}$			
						σ_a	σ_f	σ_s	σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	Σ_s	Σ_{tr}
UO_2	270	10,2	$2{,}275\cdot10^{22}$	0,312	0,0217					0,3504	0,26	0,3792	0,723
U^{235}	235	–	$6{,}14\cdot10^{20}$	–	$7{,}65\cdot10^{-5}$	496	422,7	15	511,1				
U^{238}	238	–	$2{,}21\cdot10^{22}$	–	$1{,}67\cdot10^{-3}$	2,05	–	9	11,05				
O^{16}	16	–	$4{,}55\cdot10^{22}$	–	0,02	0,00	–	3,75	3,60				
H_2O	18	1,00	$3{,}346\cdot10^{22}$	0,544	1,35	0,66	–	79,8	69	0,0221	–	2,67	2,31
Сталь	–	7,95	–	0,144	0,031	–	–	–	–	0,1965	–	0,889	1,077
Fe	56	–	$6{,}045\cdot10^{23}$	–	0,024	1,91	–	11,40	13,19				
Cr	52	–	$1{,}657\cdot10^{22}$	–	0,00266	2,35	–	4,20	6,508				
Ni	59	–	$7{,}30\cdot10^{21}$	–	0,00415	3,48	–	17,00	20,31				
Ti	48	–	$7{,}98\cdot10^{20}$	–	0,00014	4,39	–	4,20	8,548				
Mn	55	–	$1{,}31\cdot10^{21}$	–	0,00011	9,96	–	2,30	12,33				

3.1. Оптимизация параметров ячейки и расчет эффективного коэффициента размножения

Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения бесконечной среды является важной характеристикой активной зоны реактора, т. к. по его величине можно судить о целесообразности продолжения расчёта.

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется как произведение четырёх сомножителей:

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta, \tag{3.6}$$

где η – коэффициент размножения на тепловых нейтронов в горючем; ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах; φ – вероятность избежать резонансного захвата; θ – коэффициент использования тепловых нейтронов.

Эта формула называется формулой четырех сомножителей. В начальный период развития ядерных реакторов она являлась основной для расчета размножающих свойств среды. В дальнейшем эта формула утратила свою доминирующую роль, однако и в настоящее время она с успехом используется для расчета размножающих свойств некоторых типов ректоров. В нашем случае по величине k_∞ мы будем судить о целесообразности проведения дальнейших расчетов.

Для расчета k_∞ вычисляется каждый сомножитель. Так как задачей расчета является отыскание оптимальной решетки, то необходимо провести расчеты и сравнить результаты для нескольких вариантов. Так, для реакторов со стержневыми тепловыделяющими элементами необходимо выполнит расчеты для 4÷5 различных диаметров твэл и 4÷5 различных шагов решетки.

Расчет з

Согласно определению η – коэффициент, характеризующий количество вторичных нейтронов деления приходящихся на один поглощенный топливом первичный тепловой нейтрон. Выражение для η, когда топливо применяется в виде сплава или химического соединения (UO_2), имеет вид:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum_{f\,\text{топл}}}{\sum_{a\,\text{топл}}}, \tag{3.7}$$

где ν_f – число нейтронов, которое испускается при одном акте деления. Для урана-235 величина $\nu_f = 2{,}42$.

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,26}{0,3504} = 1,796. \qquad (3.8)$$

Расчет ε

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах ε – величина, которая характеризует увеличение числа нейтронов за счет деления быстрыми нейтронами (т. е. коэффициент, учитывающий вклад нейтронов деления U^{238} в общее число нейтронов).

Для определения ε в тесных решетках можно пользоваться эмпирической формулой Батя-Цыганкова:

$$\varepsilon = \varepsilon_{бл} + \frac{\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_{бл}}{1 + 2,3 \cdot \frac{N_{Н}}{N_8}}, \qquad (3.9)$$

где ε_{∞} – максимально возможное значение ($\varepsilon_{\infty} = 1,19$); $\varepsilon_{бл}$ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока, который считается по формуле:

$$\varepsilon_{бл} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}, \qquad (3.10)$$

где P – вероятность того, что нейтрон испытает какое-либо столкновение с ядром урана-238. По рис.2.1 [1, стр. 38] определяем P, при условии r/R = 0, т. к. таблетка внутреннего отверстия не имеет (она равна 0,1);

$$\varepsilon_{бл} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,0097.$$

$\frac{N_{Н}}{N_8}$ – отношение числа атомов водорода к числу атомов урана в активной зоне, определяемой равенством:

$$\frac{N_{Н}}{N_8} = 2 \cdot \frac{V_{H_2O} \cdot \gamma_{H_2O} / 18}{V_{UO_2} \cdot \gamma_{UO_2} / 238}, \qquad (3.11)$$

где V_{H_2O}, V_{UO_2} – объем воды и топлива в активной зоне ($V_{H_2O} = S_{H_2O} \cdot H = 0,775 \cdot H$, $V_{UO_2} = S_{UO_2} \cdot H = 0,445 \cdot H$); γ_{H_2O}, γ_{UO_2} – удельный вес воды и урана ($\gamma_{H_2O} = 1$ г/см^3, $\gamma_{UO_2} = 10,2$ г/см^3).

$$\frac{N_{Н}}{N_8} = 2 \cdot \frac{0,775 \cdot 1 \cdot H / 18}{0,445 \cdot 10,2 \cdot H / 238} = 4,515.$$

Подставляя все найденные значения в формулу (3.9), получим:

$$\varepsilon = 1,0097 + \frac{1,19 - 1,0097}{1 + 2,3 \cdot 4,515} = 1,0255.$$

Расчет θ

Коэффициент использования тепловых нейтронов – это вероятность для теплового нейтрона поглотиться в топливе, т. к. все рабочие каналы содержат сборки твэл, то можно использовать способ гомогенизации, при котором все материалы рабочего канала считают равномерно перемешанными.

Реальная ячейка заменяется эквивалентной ячейкой с одним фиктивным цилиндрическим блоком. Фиктивный блок образуется путем гомогенизации всего содержимого рабочего канала (ядерное горючее, конструкционные материалы, теплоноситель).

Расчёт θ в этом случае ведут в два этапа. Сначала определяют величину $\theta'_{ф}$, представлявшую отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\frac{1}{\theta'_{ф}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \sum_{а\,зам}}{S_{ф} \cdot \sum_{а\,ф}} + (E - 1). \qquad (3.12)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = \frac{\bar{\Phi}_{зам}}{\bar{\Phi}_{ф}} = \frac{R_{ф}}{L_{ф}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0 \cdot \left(\frac{R_{ф}}{L_{ф}} \right)}{I_1 \cdot \left(\frac{R_{ф}}{L_{ф}} \right)}, \qquad (3.13)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков.

С хорошим приближением коэффициент экранировки можно определить по формуле:

$$F = 1 + \frac{\left(\frac{R_{ф}}{L_{ф}} \right)^2}{8} - \frac{\left(\frac{R_{ф}}{L_{ф}} \right)^4}{192} + \ldots \qquad (3.14)$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе $(E - 1)$:

$$(E-1)=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{зам}}\right)^2\cdot\left(\ln\frac{R_{\text{зам}}}{R_{\text{ф}}}-0,75\right). \qquad (3.15)$$

Затем рассчитывают коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле:

$$\theta=\theta'_{\text{ф}}\cdot\theta_0, \qquad (3.16)$$

где θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока.

$$\theta_0=\frac{\sum_{a\,\text{топл}}\cdot S_{\text{топл}}}{\sum_{a\,\text{ф}}\cdot S_{\text{ф}}} \qquad (3.17)$$

Необходимо отметить, что ячейка реактора типа ВВЭР представляет собой ТВС с размещенными внутри твэлами. Твэлы образуют тесную решетку, в связи с этим ячейку ВВЭР нельзя гомогенизировать, так как найденные значения коэффициента экранировки F и $(E-1)$ не будут соответствовать действительности. Для расчета коэффициента θ в качестве элементарной ячейки, которая впоследствии гомогенизируется, берется один твэл окруженный водой.

$$R_{\text{ф}}=R_{\text{твэл}}=0,455\ \text{см},\ S_{\text{ф}}=\pi\cdot\left(R_{\text{ф}}\right)^2=0,65\ \text{см}^2,$$

$$S_{\text{табл}}=\pi\cdot(R_{\text{табл}})^2=3,14\cdot(0,3765)^2=0,445\ \text{см}^2,$$

$$S_{\text{км}}=S_{\text{ф}}-S_{\text{табл}}=0,65-0,445=0,205\ \text{см}^2,$$

$$S_{\text{зам}}=\left(\frac{S_{\text{яч}}}{126}\right)-S_{\text{ф}}=\left(\frac{179,58}{126}\right)-0,65=0,775\ \text{см}^2,$$

$$R_{\text{зам}}=\sqrt{\frac{S_{\text{зам}}}{\pi}}=\sqrt{\frac{0,775}{3,14}}=0,497\ \text{см}.$$

Сечения, усредненные по фиктивному блоку, рассчитываются следующим образом:

$$\sum_{a\,\text{ф}}=\frac{1}{S_{\text{ф}}}\cdot\sum_{i=1}^{m}\sum_{a\,i}\cdot S_i=\frac{\sum_{a\,\text{топл}}\cdot S_{\text{топл}}+\sum_{a\,\text{км}}\cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{ф}}}=0,302\ \text{см}^{-1},$$

$$\sum_{tr\,\text{ф}}=\frac{1}{S_{\text{ф}}}\cdot\sum_{i=1}^{m}\sum_{tr\,i}\cdot S_i=\frac{\sum_{tr\,\text{топл}}\cdot S_{\text{топл}}+\sum_{tr\,\text{км}}\cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{ф}}}=0,8346\ \text{см}^{-1}.$$

$$L_{\text{ф}}^2=\frac{1}{3\cdot\sum_{a\,\text{ф}}\cdot\sum_{tr\,\text{ф}}}=\frac{1}{3\cdot0,302\cdot0,8346}=1,32\ \text{см}^2,\ L_{\text{ф}}=1,149\,\text{см},\ L_{\text{зам}}=2,72\ \text{см}.$$

$$(E-1)=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{0,497}{2,72}\right)^2\cdot\left(\ln\frac{0,497}{0,455}-0,75\right)=-0,011$$

Отрицательный результат фактора, учитывающего избыточное поглощение нейтронов в замедлителе, показывает что внешний блок-эффект отсутствует.

$$F=1+\frac{\left(\frac{0,455}{1,149}\right)^2}{8}-\frac{\left(\frac{0,455}{1,149}\right)^4}{192}=1,01947$$

$\frac{1}{\theta'_{ф}}=1+1,01947\cdot\frac{0,775\cdot0,0221}{0,65\cdot0,302}+(-0,011)=1,078$, следовательно отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов равно: $\theta'_{ф}=0,9276$.

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0=\frac{0,3504\cdot0,445}{0,302\cdot0,65}=0,794.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов θ равен:

$$\theta=0,794\cdot0,9276=0,7365.$$

Расчет φ

Вероятность избежать резонансного захвата – это доля нейтронов не поглотившихся при замедлении. В энергетических ядерных реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стрежневыми блоками коэффициент φ рассчитывается по формуле:

$$\varphi=\exp\left[-\frac{\left(K_т\cdot R_{UO_2}\cdot\sqrt{R\cdot n\cdot\varepsilon_1}+0,73\cdot n\cdot R_{UO_2}^2\cdot\varepsilon_1\right)}{\left(\xi\Sigma_{s\,зам}\cdot S_{зам}\right)}\right],\qquad(3.18)$$

где $\xi\Sigma_{s\,зам}$ – замедляющая способность замедлителя, $S_{зам}$ – площадь замедлителя, R_{UO_2} – радиус уранового блока, $K_т$ – температурный коэффициент, n – число стержней в пучке, R – радиус пучка, ε_1 – пористость блока по урану-238.

Коэффициент $K_т$ имеет вид: $K_т = 0,775 \cdot \left(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{UO_2}}\right)$,

где T_{UO_2} – средняя температура урана в К, T_{UO_2} = 400 К;

$$K_т = 0,775 \cdot \left(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{400}\right) = 1,04625.$$

Определим пористость блока по урану-238:

$\varepsilon_1 = \dfrac{N_8}{N_{08}}$, где N_{08} – число ядер U^{238} в 1 см^3 естественного урана, N_8 – число ядер U^{238} в 1 см^3 блока.

$$\varepsilon_1 = \frac{2,2136 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,023 \cdot 10^{22} \cdot 0,973 \cdot 18,7} = 0,4807.$$

$$S_{зам} = 97,67 \text{ см}^2, \; R_{топл} = 0,3765 \text{ см}, \; R = R_{яч}^{ф} - R_{тк} = \sqrt{\frac{S_{яч}}{\pi}} - 0,15 = 7,41,$$

где $R_{тк}$ – толщина стенки кассеты.

Подставляя все величины в формулу (3.18) найдем вероятность избежать резонансного поглощения:

$$\varphi = \exp\left[-\frac{\left(1,046 \cdot 0,3765 \cdot \sqrt{7,41 \cdot 126 \cdot 0,4807} + 0,73 \cdot 126 \cdot 0,3765^2 \cdot 0,4807\right)}{\left(1,35 \cdot 97,67\right)}\right] = 0,896.$$

Найденные значения коэффициентов подставим в формулу (3.6), получим значение коэффициента для бесконечной среды:

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta = 1,796 \cdot 1,0255 \cdot 0,7365 \cdot 0,896 = 1,215.$$

Оптимизация параметров ячейки

Исходные данные для оптимизации:

Макросечение поглощения в КМ ..... 0.197 см$^{-1}$
Макросечение транспортное в КМ ..... 1.077 см$^{-1}$
Макросечение поглощения воды ..... 0.0221 см$^{-1}$
Макросечение транспортное воды .....2.31 см$^{-1}$
Замедляющая способность воды .....1.35 см$^{-1}$
Замедляющая способность топлива ..... 0.0217 см$^{-1}$
Замедляющая способность КМ ..... 0.031 см$^{-1}$
Температура горючего (средняя) .....400 К
Плотность воды .....0.7679 г/см^3
Макросечение поглощения твэл ..... 0.3504 см$^{-1}$

Макросечение поглощения топлива (урана) в твэл..... 0.3504 $см^{-1}$
Транспортное макросечение твэл ..... 0.723 $см^{-1}$
Макросечение поглощения U-235.....496 $см^{-1}$
Микросечение деления U-235 ..... 423 барн
Микросечение поглощения U-238 ..... 2.05 барн
Обогащение горючего по U-235..... 0.027
Пористость блока по U-238 ..... 0.4807
Нижнее значение величины шага твэл в кассете..... 1см
Верхнее значение величины шага твэл в кассете..... 1.450см
Интервал изменения шага решетки 0.045см
Нижнее значение внешнего радиуса твэл 0.415см
Верхнее значение внешнего радиуса твэл..... 0.495см
Интервал изменения радиуса твэл 0.01см
Площадь дополнительных материалов в ТК .....0 $см^2$
Толщина внешней оболочки твэл ..... 0.04 см
Толщина стенки кассеты..... 0.15 см
Толщина водного зазора между кассетами..... 0.3 см
Число твэл в крайнем ряду кассеты..... 7

Проведя оптимизацию, были выбраны следующие параметры ячейки:

Шаг решетки..... 1.23 см
Радиус твэл ..... 0.445 см
Коэффициент размножения
на тепловых нейтронах в топливе (η)..... 1.8334
Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (ε)..... 1.0313
Вероятность избежать резонансного захвата (φ) 0.7581
Коэффициент использования
тепловых нейтронов внутри фикт. блока (θ_0)..... 0.9064
Отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фикт.
блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов ($\theta_ф$) 0.9633
Коэффициент использования тепловых нейтронов (θ) 0.8731
Коэффициент размножения для бесконечной среды (k_∞)..... 1.2516
Коэффициент экранировки (F)..... 1.0222
Площадь, занимаемая топливом ($S_{топл}$).....0,6221 $см^2$
Площадь, занимаемая теплоносителем ($S_{тн}$) .....0,7343 $см^2$
Площадь, занимаемая конструкционными материалами ($S_{км}$).....0,1142 $см^2$

Уточнение скорости прокачки теплоносителя

Прежде, чем приступать к расчету эффективного коэффициента размножения, необходимо уточнить скорость прокачки теплоносителя. Параметры новой ячейки:

шаг решетки.....A = 1,23 см

радиус твэл.....$R_{твэл}$ = 0,445 см.

С учетом новых параметров произведем расчет.

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 75 \cdot 2{,}9 = 217{,}5 \text{ кВт/см}^3.$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$П_0 = 3{,}14 \cdot 2 \cdot 0{,}445 = 2{,}7946 \text{ см};$$

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{0{,}116 \cdot \Pi_0 \cdot n} = \frac{217{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 179{,}58}{0{,}116 \cdot 2{,}7946 \cdot 126} = 0{,}956 \ \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Необходимая скорость прокачки теплоносителя:

$$S = \frac{S_{яч} - n\dfrac{\pi \cdot d^2}{4}}{n} = \frac{179{,}58 - 126 \cdot \dfrac{\pi \cdot 0{,}89^2}{4}}{126} = 0{,}803 \text{ см},$$

$$\nu = \frac{q_{\max} \cdot П_0 \cdot H_{а.з.}}{3{,}6 \cdot K_z \cdot \gamma \cdot \Delta i \cdot S} = \frac{0{,}956 \cdot 2{,}7946 \cdot 272{,}6}{3{,}6 \cdot 1{,}5 \cdot 767{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 24{,}2 \cdot 0{,}7343} = 9{,}9 \approx 10 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Получившаяся скорость относится к предельной (ν = 10 м/с), следовательно ее требуется пересчитать.

Для проведения расчета были приняты следующие величины:

Среднеинтегральное значение мощности ..... $\bar{N}_0$ = 83 кВт/л

Коэффициент увеличения активной зоны.....η = 1,1

Отношение высоты к диаметру ..... m = 0,87

Объемный коэффициент неравномерности .....K_V = 2

Осевой коэффициент неравномерности ..... K_z = 1,5

$$V_{а.з.} = \frac{N}{\bar{N}_0}\eta = \frac{1500 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{83 \cdot 10^3} \cdot 1{,}1 = 19{,}87 \cdot 10^6 \text{ см}^3,$$

$$D_{\text{а.з.}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{а.з.}}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 19{,}87 \cdot 10^6}{3{,}14 \cdot 0.87}} = 307{,}5 \text{ см},$$

$$H = m \cdot D_{\text{а.з.}} = 0,87 \cdot 307,5 = 267,5 \text{ см},$$

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 83 \cdot 2 = 166 \text{ кВт}/\text{см}^3,$$

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot n} = \frac{166 \cdot 10^{-3} \cdot 179,58}{0,116 \cdot 2,7946 \cdot 126} = 0,7298 \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}},$$

$$\nu = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{\text{а.з.}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \gamma \cdot \Delta i \cdot S} = \frac{0,7298 \cdot 2,7946 \cdot 267,5}{3,6 \cdot 1,5 \cdot 767,9 \cdot 10^{-3} \cdot 24,2 \cdot 0,7343} = 7,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям (ν < 10 м/с – для воды).

Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения реактора вычисляется по формуле, которая имеет вид:

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_\infty \cdot \exp\left[-B^2 \cdot \tau_p\right]}{1 + B^2 \cdot L_p^2}, \tag{3.19}$$

где L_p^2 – длина диффузии, которая с учетом гетерогенности определяется по формуле: $L_p^2 = L_{\text{зам}}^2 (1 - \text{и}) + L_{\text{бл}}^2 \cdot \text{и}$, (3.20)

т. к. $L_{\text{бл}}^2 = 1,32 \text{ см}^2$, $L_{\text{зам}}^2 = 2,72^2 = 7,398 \text{ см}^2$, $\theta = 0,7839$, то длина диффузии равна:

$$L_p^2 = 7,398(1 - 0,7839) + 1,32 \cdot 0,7839 = 2,634;$$

τ_p – возраст нейтронов.

Возраст нейтронов – это есть $1/6$ среднего квадрата расстояния по прямой, на которое смещается нейтрон от точки рождения с энергией E_0 до точки, где он замедлился до энергии E. В уран-водной решетке возраст нейтронов (тесная решетка) может быть найден по экспериментальной формуле С.М. Фейнберга:

$$\tau_p = \tau_{H_2O} \left(\frac{S_{\text{яч}}}{S_{H_2O}} \right)^{0.5}. \tag{3.21}$$

Возраст нейтронов в чистом замедлителе равен $\tau_{H_2O} = 27,3 \text{ см}^2$

$$S_{\text{яч}} = 179,58 \text{ см}^2, \quad S_{H_2O} = 92,5218 \text{ см}^2,$$

$$\tau_p = 27,3 \left(\frac{179,58}{92,5218} \right)^{0,5} = 38,03 \text{ см}^2;$$

B^2 – геометрический параметр.

Для реактора с отражателем при применении этой формулы необходимо учитывать эффективные добавки за счет отражателя. Расчёт по этой формуле можно производить, если уже заданы размеры реактора. В этом случае при расчёте геометрического параметра фактические полуразмеры зоны увеличиваются на величину эффективной добавки δ.

Для водо-водяных реакторов с водяным отражателем $\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40)$, где M^2 – площадь миграции отражателя:

$$M^2 = \tau_{H_2O} + L^2_{H_2O} = 27,3 + 7,398 = 34,698 \text{ см}^2,$$

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (34,698 - 40) = 6,698 \text{ см}.$$

На основании проведенных расчетов определим эквивалентные размеры реактора:

$$H_э = H + 2 \cdot \delta = 280,8396 \text{ см},$$
$$R_э = R + \delta = 160,4198 \text{ см}.$$

Находим геометрический размер

$$B^2 = \left(\frac{3,14}{280,8396} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{160,4198} \right)^2 = 0,00035 \text{ см}^{-2}.$$

Найденные значения подставляем в формулу (3.19) и получаем

$$k_{эф} = \frac{1,2516 \cdot \exp\left[-0,00035 \cdot 38,03\right]}{1 + 0,00035 \cdot 2,634} = 1,234.$$

Температурный эффект реактивности

При работе реактора происходит существенное повышение температуры всех материалов активной зоны, отражателя и корпуса реактора.

При повышении температуры повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Повышение температуры приводит к уменьшению их плотности вследствие расширения материалов, что приводит к уменьшению числа ядер в единице объема и, следовательно, к уменьшению макросечений. Повышение Т вызывает смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющихся нейтронов в область больших энергий. Сдвиг энергии «сшивки» приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов.

Повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансов горючего вследствие их теплового движения.

Все это приводит к изменению реактивности реактора.

Зависимость поперечных сечений от температуры

Для расчета реактора при рабочей температуре нужно найти эффективную температуру нейтронов и соответствующие ей новые значения сечений и других параметров реактора.

При расчете можно принимать, что средняя температура замедлителя равна средней температуре теплоносителя, но это справедливо только для стержневых твэл.

Эффективная температура нейтронного газа определяется по формуле:

$$T_{\text{эфф}}^{\text{н.г.}} = T_{\text{зам}}\left(1+1,4\frac{\overline{\Sigma}_a^{\text{яч}}\left(kT_{\text{зам}}\right)}{\overline{\xi\Sigma}_s^{\text{яч}}\left(kT_{\text{зам}}\right)}\right),\ \text{К}. \qquad (3.21)$$

Сечения $\overline{\Sigma}_a^{\text{яч}}$ и $\overline{\xi\Sigma}_s^{\text{яч}}$ берутся при температуре замедлителя.

Определим температуру замедлителя:

$$T_{\text{зам}} = \frac{T_{\text{вх}}+T_{\text{вых}}}{2} = \frac{260+280}{2}+273 = 543\ \text{К}.$$

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\overline{\sigma}_a(T_{\text{н.г.}}) = \sigma_{a0}\cdot 0,886\cdot f_a(T_{\text{н.г.}})\cdot\sqrt{\frac{293}{T_{\text{н.г.}}}}\cdot F(\chi_{\text{гр}}), \qquad (3.22)$$

где σ_{a0} – макроскопическое сечение поглощения стандартных нейтронов, $f_a(T_{\text{н.г.}})$ – поправочный коэффициент, который характеризует отклонение сечения от закона $1/\text{н}$. Аналогично можно определить и σ_f.

Обычно зависимость сечения рассеяния σ_s от температуры очень слабая.

Дальнейший расчет микро- и макро- сечений проводится аналогично расчету «холодного» реактора при условии, что $T_{\text{н.г.}} = T_{\text{зам}}$. Формулы (3.2) и (3.3) в этом случае имеют вид:

$$\overline{\sigma}_a(T_{\text{зам}}) = \sigma_{a_0}\cdot 0,884\cdot f_a(T_{\text{зам}})\cdot\sqrt{\frac{293}{T_{\text{зам}}}},$$

$$\overline{\sigma}_f(T_{\text{зам}}) = \sigma_{f_0}\cdot 0,884\cdot f_f(T_{\text{зам}})\cdot\sqrt{\frac{293}{T_{\text{зам}}}}.$$

Микро- и макросечения для U^{235}

Поправочный коэффициент для температуры 543 К находится путем интерполирования, который составляет $f_a = f_f = 0,943$.

Тогда, с учетом поправок, сечения для U^{235} получаем:

$$\sigma_a^{U^5}(T_{\text{зам}}) = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{зам}}}} = 683 \cdot 0{,}884 \cdot 0{,}943 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 418{,}23 \text{ барн},$$

$$\sigma_f^{U^5}(T_{\text{зам}}) = \sigma_{f_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{зам}}}} = 582 \cdot 0{,}884 \cdot 0{,}943 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 356{,}39 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{U^5} = 15 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{U^5} = 0,$$

$$\sigma_{tr}^{U^5} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_s^{U^5} \cdot \left(1 - \mu_s^{U^5}\right) = 418{,}23 + 15 \cdot (1 - 0) = 433{,}23 \text{ барн},$$

$$\xi_{U^5} = \frac{2}{A_{U^5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 0{,}0085,$$

$$\Sigma_a^{U^5} = \sigma_a^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 418{,}23 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}0614 \cdot 10^{22} = 0{,}257 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_f^{U^5} = \sigma_f^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 356{,}39 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}0614 \cdot 10^{22} = 0{,}219 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{U^5} = \sigma_s^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}0614 \cdot 10^{22} = 0{,}0092 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{U^5} = \sigma_{tr}^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 433{,}23 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}0614 \cdot 10^{22} = 0{,}266 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{U^5} = 0{,}0085 \cdot 0{,}009 = 7{,}65 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для U^{238}

$$\sigma_a^{U^8} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 2{,}71 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 1{,}7598 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{U^8} = 9 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{U^8} = 0,$$

$$\sigma_{tr}^{U^8} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_s^{U^8} \cdot \left(1 - \mu_s^{U^8}\right) = 1{,}76 + 9 \cdot (1 - 0) = 10{,}76 \text{ барн},$$

$$\xi_{U^5} = \frac{2}{A_{U^5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 0{,}0084,$$

$$\Sigma_a^{U^8} = \sigma_a^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 1{,}76 \cdot 10^{-24} \cdot 2{,}2136 \cdot 10^{22} = 0{,}039 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{U^8} = \sigma_s^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 2{,}2136 \cdot 10^{22} = 0{,}199 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{U^8} = \sigma_{tr}^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 10{,}76 \cdot 10^{-24} \cdot 2{,}2136 \cdot 10^{22} = 0{,}238 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{U^8} = 0{,}0085 \cdot 0{,}199 = 1{,}67 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для кислорода

$$\sigma_a^O = 0 \text{ барн}, \quad \sigma_s^O = 3{,}75 \text{ барн}, \quad \mu_s^O = 0{,}04,$$

$$\sigma_{tr}^O = \sigma_a^O + \sigma_s^O \cdot \left(1 - \mu_s^O\right) = 0 + 3{,}75 \cdot (1 - 0{,}04) = 3{,}6 \text{ барн},$$

$$\xi_O = \frac{2}{A_O + \frac{2}{3}} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0{,}12,$$

$$\Sigma_a^O = \sigma_a^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 0 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^O = \sigma_s^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 3{,}75 \cdot 10^{-24} \cdot 4{,}55 \cdot 10^{22} = 0{,}171 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^O = \sigma_{tr}^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 3{,}6 \cdot 10^{-24} \cdot 4{,}55 \cdot 10^{22} = 0{,}164 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^O = 0{,}12 \cdot 0{,}171 = 0{,}02 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для UO_2

$$\sigma_a^{UO_2} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_a^{U^8} + \sigma_a^O = 419{,}99 \text{ барн},$$

$$\sigma_f^{UO_2} = \sigma_f^{U^5} = 356{,}39 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{UO_2} = \sigma_s^{U^5} + \sigma_s^{U^8} + \sigma_s^O = 27{,}75 \text{ барн},$$

$$\sigma_{tr}^{UO_2} = \sigma_{tr}^{U^5} + \sigma_{tr}^{U^8} + \sigma_{tr}^O = 447{,}59 \text{ барн},$$

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^5} + \Sigma_a^{U^8} + \Sigma_a^O = 0{,}296 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^5} = 0{,}219 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^5} + \Sigma_s^{U^8} + \Sigma_s^O = 0{,}3792 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^5} + \Sigma_{tr}^{U^8} + \Sigma_{tr}^O = 0{,}668 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{UO_2} = \xi\Sigma_s^{U^5} + \xi\Sigma_s^{U^8} + \xi\Sigma_s^O = 0{,}0217 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для железа (Fe)

$$\sigma_a^{Fe} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 2{,}53 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 1{,}643 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Fe} = 11{,}4 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Fe} = 0{,}01,$$

$$\xi_{Fe} = \frac{2}{A_{Fe} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{56 + \frac{2}{3}} = 0{,}035,$$

$$\sigma_{tr}^{Fe} = \sigma_a^{Fe} + \sigma_s^{Fe} \cdot \left(1 - \mu_s^{Fe}\right) = 1{,}643 + 11{,}4 \cdot (1 - 0{,}01) = 12{,}929 \text{ барн},$$

$$\Sigma_a^{Fe} = \sigma_a^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 1{,}91 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}6045 \cdot 10^{23} = 1{,}155 \cdot 10^{-1} = 0{,}116 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Fe} = \sigma_s^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 11{,}4 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}6045 \cdot 10^{23} = 0{,}689 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Fe} = \sigma_{tr}^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 12{,}929 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}6045 \cdot 10^{23} = 0{,}782 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Fe} = 0{,}035 \cdot 0{,}689 = 0{,}024 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для хрома (Cr)

$$\sigma_a^{Cr} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 3{,}1 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 2{,}013 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Cr} = 4{,}2 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Cr} = 0{,}01,$$

$$\sigma_{tr}^{Cr} = \sigma_a^{Cr} + \sigma_s^{Cr} \cdot \left(1 - \mu_s^{Cr}\right) = 2{,}013 + 4{,}2 \cdot (1 - 0{,}01) = 6{,}171 \text{ барн},$$

$$\xi_{Cr} = \frac{2}{A_{Cr} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{52 + \frac{2}{3}} = 0{,}038,$$

$$\Sigma_a^{Cr} = \sigma_a^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 2{,}013 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}1657 \cdot 10^{23} = 0{,}0334 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Cr} = \sigma_s^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Cr} = 4{,}2 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}1657 \cdot 10^{23} = 0{,}07 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Cr} = \sigma_{tr}^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Cr} = 6{,}171 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}1657 \cdot 10^{23} = 0{,}102 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Cr} = 0{,}038 \cdot 0{,}07 = 2{,}66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для никеля (Ni)

$$\sigma_a^{Ni} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 4{,}6 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 2{,}987 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Ni} = 17 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Ni} = 0{,}01,$$

$$\sigma_{tr}^{Ni} = \sigma_a^{Ni} + \sigma_s^{Ni} \cdot \left(1 - \mu_s^{Ni}\right) = 2{,}987 + 17 \cdot (1 - 0{,}01) = 19{,}817 \text{ барн},$$

$$\xi_{Ni} = \frac{2}{A_{Ni} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{59 + \frac{2}{3}} = 0{,}0335,$$

$$\Sigma_a^{Ni} = \sigma_a^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 2{,}987 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}073 \cdot 10^{23} = 0{,}0218 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Ni} = \sigma_s^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 17 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}073 \cdot 10^{23} = 0{,}124 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Ni} = \sigma_{tr}^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 19{,}817 \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}073 \cdot 10^{23} = 0{,}145 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Ni} = 0{,}0335 \cdot 0{,}124 = 4{,}154 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для титана (Ti)

$$\sigma_a^{Ti} = \sigma_{a_0} \cdot 0{,}884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 5{,}8 \cdot 0{,}884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 3{,}766 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Ti} = 4{,}2 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Ti} = 0{,}01,$$

$$\sigma_{tr}^{Ti} = \sigma_a^{Ti} + \sigma_s^{Ti} \cdot \left(1 - \mu_s^{Ti}\right) = 3{,}766 + 4{,}2 \cdot (1 - 0{,}01) = 7{,}924 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi_{Ti} = \frac{2}{A_{Ti} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{48 + \frac{2}{3}} = 0{,}041$$

$$\Sigma_a^{Ti} = \sigma_a^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 3,766 \cdot 10^{-24} \cdot 0,00798 \cdot 10^{23} = 0,003 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Ti} = \sigma_s^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 4,2 \cdot 10^{-24} \cdot 0,00798 \cdot 10^{23} = 0,00335 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Ti} = \sigma_{tr}^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 7,924 \cdot 10^{-24} \cdot 0,00798 \cdot 10^{23} = 0,0063 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Ti} = 0,041 \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для марганца (Mn)

$$\sigma_a^{Mn} = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}} = 13,16 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{543}} = 8,546 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{Mn} = 2,3 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Mn} = 0,01, \qquad \sigma_{tr}^{Mn} = 10,823 \text{ барн},$$
$$\xi_{Mn} = \frac{2}{A_{Mn} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{55 + \frac{2}{3}} = 0,0359,$$
$$\Sigma_a^{Mn} = \sigma_a^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 8,546 \cdot 10^{-24} \cdot 1,31 \cdot 10^{21} = 0,011 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Mn} = \sigma_s^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 2,3 \cdot 10^{-24} \cdot 1,31 \cdot 10^{21} = 0,003 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Mn} = \sigma_{tr}^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 10,823 \cdot 10^{-24} \cdot 1,31 \cdot 10^{21} = 0,014 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Mn} = 0,0359 \cdot 0,003 = 1,077 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для стали

$$\sigma_a^{сталь} = \sigma_a^{Fe} + \sigma_a^{Cr} + \sigma_a^{Ni} + \sigma_a^{Ti} + \sigma_a^{Mn} = 18,955 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{сталь} = \sigma_s^{Fe} + \sigma_s^{Cr} + \sigma_s^{Ni} + \sigma_s^{Ti} + \sigma_s^{Mn} = 39,1 \text{ барн},$$
$$\sigma_{tr}^{сталь} = \sigma_{tr}^{Fe} + \sigma_{tr}^{Cr} + \sigma_{tr}^{Ni} + \sigma_{tr}^{Ti} + \sigma_{tr}^{Mn} = 57,664 \text{ барн},$$
$$\Sigma_a^{сталь} = \Sigma_a^{Fe} + \Sigma_a^{Cr} + \Sigma_a^{Ni} + \Sigma_a^{Ti} + \Sigma_a^{Mn} = 0,1685 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{сталь} = \Sigma_s^{Fe} + \Sigma_s^{Cr} + \Sigma_s^{Ni} + \Sigma_s^{Ti} + \Sigma_s^{Mn} = 0,889 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{сталь} = \Sigma_{tr}^{Fe} + \Sigma_{tr}^{Cr} + \Sigma_{tr}^{Ni} + \Sigma_{tr}^{Ti} + \Sigma_{tr}^{Mn} = 1,0493 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{\text{сталь}} = \xi\Sigma_s^{Fe} + \xi\Sigma_s^{Cr} + \xi\Sigma_s^{Ni} + \xi\Sigma_s^{Ti} + \xi\Sigma_s^{Mn} = 0,031 \text{ см}^{-1}.$$

С учетом пересчитанного сечения, получаем усредненные сечения по ячейке:

$$\Sigma_a^{\text{яч}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \Sigma_{ai} \cdot S_i}{S_{\text{яч}}} = \frac{\Sigma_{a\,\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \Sigma_{a\,\text{зам}} \cdot S_{\text{зам}} + \Sigma_{a\,\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{яч}}} = 0,148 \text{ см}^{-1}$$

$$\xi\Sigma_s^{\text{яч}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \Sigma_{si} \cdot S_i}{S_{\text{яч}}} = \frac{\xi\Sigma_{s\,\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \xi\Sigma_{s\,\text{зам}} \cdot S_{\text{зам}} + \xi\Sigma_{s\,\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{яч}}} = 0,7604 \text{ см}^{-1}$$

Тогда температура нейтронного газа, определяемая по формуле (3.21), будет равна:

$$T_{\text{эфф}}^{\text{н.г.}} = 543 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{0,148}{0,7604}\right) = 690,96, \text{ К.}$$

Определим точку пересечения спектров Ферми и Максвелла как отношение макросечения поглощения к замедляющей способности:

$$f_{\text{гр}} = \frac{\Sigma_a^{\text{яч}}}{\xi\Sigma_s^{\text{яч}}} = \frac{0,148}{0,7604} = 0,1946,$$

для данной точки по рис. 2.3. [1, стр. 50] определяем $\chi_{\text{гр}} = 5,5$, которой соответствует $F = 1,025$.

Пересчитаем микросечения для данной температуры по формуле (3.22):

Микро- и макросечения для U^{235}

Поправочный коэффициент для температуры 690,96 К находится путем интерполирования, который составляет $f_a = f_f = 0,943$.

Тогда, с учетом поправок, сечения для U^{235} получаем:

$$\sigma_a^{U^5}(T_{\text{зам}}) = 683 \cdot 0,886 \cdot 0,9326 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 376,69 \text{ барн},$$

$$\sigma_f^{U^5}(T_{\text{зам}}) = 582 \cdot 0,886 \cdot 0,9326 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 320,98 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{U^5} = 15 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{U^5} = 0,$$

$$\sigma_{tr}^{U^5} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_s^{U^5} \cdot \left(1 - \mu_s^{U^5}\right) = 376,69 + 15 \cdot (1 - 0) = 391,69 \text{ барн},$$

$$\xi_{U^5} = \frac{2}{A_{U^5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 0,0085,$$

$$\Sigma_a^{U^5} = \sigma_a^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 376,69 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,231 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_f^{U^5} = \sigma_f^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 320,98 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,197 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{U^5} = \sigma_s^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,0092 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{U^5} = \sigma_{tr}^{U^5} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^5} = 391,69 \cdot 10^{-24} \cdot 0,0614 \cdot 10^{22} = 0,24 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{U^5} = 0,0085 \cdot 0,009 = 7,65 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для U^{238}

$$\sigma_a^{U^8} = 2,71 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 1,603 \text{ барн},$$

$\sigma_s^{U^8} = 9$ барн, $\mu_s^{U^8} = 0,$

$\sigma_{tr}^{U^8} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_s^{U^8} \cdot \left(1 - \mu_s^{U^8}\right) = 1,599 + 9 \cdot (1 - 0) = 10,599$ барн,

$$\xi_{U^5} = \frac{2}{A_{U^5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 0,0084$$

$\Sigma_a^{U^8} = \sigma_a^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 1,603 \cdot 10^{-24} \cdot 2,2136 \cdot 10^{22} = 0,035$ см$^{-1}$,

$\Sigma_s^{U^8} = \sigma_s^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 2,2136 \cdot 10^{22} = 0,199$ см$^{-1}$,

$\Sigma_{tr}^{U^8} = \sigma_{tr}^{U^8} \cdot 10^{-24} \cdot N_{U^8} = 10,599 \cdot 10^{-24} \cdot 2,2136 \cdot 10^{22} = 0,235$ см$^{-1}$,

$\xi\Sigma_s^{U^8} = 0,0085 \cdot 0,199 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ см$^{-1}$.

Микро- и макросечения для кислорода

$\sigma_a^O = 0$ барн, $\sigma_s^O = 3,75$ барн, $\mu_s^O = 0,04,$

$\sigma_{tr}^O = \sigma_a^O + \sigma_s^O \cdot \left(1 - \mu_s^O\right) = 0 + 3,75 \cdot (1 - 0,04) = 3,6$ барн,

$$\xi_O = \frac{2}{A_O + \frac{2}{3}} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,12,$$

$\Sigma_a^O = \sigma_a^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 0$ см$^{-1}$,

$\Sigma_s^O = \sigma_s^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 3,75 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{22} = 0,171$ см$^{-1}$,

$\Sigma_{tr}^O = \sigma_{tr}^O \cdot 10^{-24} \cdot N_O = 3,6 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{22} = 0,164$ см$^{-1}$,

$\xi\Sigma_s^O = 0,12 \cdot 0,171 = 0,02$ см$^{-1}$.

Микро- и макросечения для UO_2

$\sigma_a^{UO_2} = \sigma_a^{U^5} + \sigma_a^{U^8} + \sigma_a^O = 378,293$ барн,

$\sigma_f^{UO_2} = \sigma_f^{U^5} = 320,98$ барн,

$\sigma_s^{UO_2} = \sigma_s^{U^5} + \sigma_s^{U^8} + \sigma_s^O = 27,75$ барн,

$\sigma_{tr}^{UO_2} = \sigma_{tr}^{U^5} + \sigma_{tr}^{U^8} + \sigma_{tr}^O = 405,889$ барн,

$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^5} + \Sigma_a^{U^8} + \Sigma_a^O = 0,266$ см$^{-1}$,

$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^5} = 0,197$ см$^{-1}$,

$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^5} + \Sigma_s^{U^8} + \Sigma_s^O = 0,3792$ см$^{-1}$,

$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^5} + \Sigma_{tr}^{U^8} + \Sigma_{tr}^O = 0,639$ см$^{-1}$,

$\xi\Sigma_s^{UO_2} = \xi\Sigma_s^{U^5} + \xi\Sigma_s^{U^8} + \xi\Sigma_s^O = 0,0217$ см$^{-1}$.

Микро- и макросечения для железа (Fe)

$$\sigma_a^{Fe} = 2,53 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 1,496 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Fe} = 11,4 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Fe} = 0,01,$$

$$\xi_{Fe} = \frac{2}{A_{Fe} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{56 + \frac{2}{3}} = 0,035,$$

$$\sigma_{tr}^{Fe} = \sigma_a^{Fe} + \sigma_s^{Fe} \cdot \left(1 - \mu_s^{Fe}\right) = 1,496 + 11,4 \cdot (1 - 0,01) = 12,782 \text{ барн},$$

$$\Sigma_a^{Fe} = \sigma_a^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 1,496 \cdot 10^{-24} \cdot 0,6045 \cdot 10^{23} = 0,09 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Fe} = \sigma_s^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 11,4 \cdot 10^{-24} \cdot 0,6045 \cdot 10^{23} = 0,689 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Fe} = \sigma_{tr}^{Fe} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 12,782 \cdot 10^{-24} \cdot 0,6045 \cdot 10^{23} = 0,773 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Fe} = 0,035 \cdot 0,689 = 0,024 \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для хрома (Cr)

$$\sigma_a^{Cr} = 3,1 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 1,833 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Cr} = 4,2 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Cr} = 0,01,$$

$$\sigma_{tr}^{Cr} = \sigma_a^{Cr} + \sigma_s^{Cr} \cdot \left(1 - \mu_s^{Cr}\right) = 1,833 + 4,2 \cdot (1 - 0,01) = 5,991 \text{ барн},$$

$$\xi_{Cr} = \frac{2}{A_{Cr} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{52 + \frac{2}{3}} = 0,038,$$

$$\Sigma_a^{Cr} = \sigma_a^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Fe} = 1,833 \cdot 10^{-24} \cdot 0,1657 \cdot 10^{23} = 0,03 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_s^{Cr} = \sigma_s^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Cr} = 4,2 \cdot 10^{-24} \cdot 0,1657 \cdot 10^{23} = 0,07 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{tr}^{Cr} = \sigma_{tr}^{Cr} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Cr} = 5,991 \cdot 10^{-24} \cdot 0,1657 \cdot 10^{23} = 0,0992 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\Sigma_s^{Cr} = 0,038 \cdot 0,07 = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для никеля (Ni)

$$\sigma_a^{Ni} = 4,6 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 2,72 \text{ барн},$$

$$\sigma_s^{Ni} = 17 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Ni} = 0,01,$$

$$\sigma_{tr}^{Ni} = \sigma_a^{Ni} + \sigma_s^{Ni} \cdot \left(1 - \mu_s^{Ni}\right) = 2,72 + 17 \cdot (1 - 0,01) = 19,72 \text{ барн},$$

$$\xi_{Ni} = \frac{2}{A_{Ni} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{59 + \frac{2}{3}} = 0,0335,$$

$$\Sigma_a^{Ni} = \sigma_a^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 2,72 \cdot 10^{-24} \cdot 0,073 \cdot 10^{23} = 0,0199 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Ni} = \sigma_s^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 17 \cdot 10^{-24} \cdot 0,073 \cdot 10^{23} = 0,124 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Ni} = \sigma_{tr}^{Ni} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ni} = 19,72 \cdot 10^{-24} \cdot 0,073 \cdot 10^{23} = 0,144 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Ni} = 0,0335 \cdot 0,124 = 4,154 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для титана (Ti)

$$\sigma_a^{Ti} = 5,8 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 3,43 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{Ti} = 4,2 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Ti} = 0,01,$$
$$\sigma_{tr}^{Ti} = \sigma_a^{Ti} + \sigma_s^{Ti} \cdot \left(1 - \mu_s^{Ti}\right) = 3,43 + 4,2 \cdot (1 - 0,01) = 7,588 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi_{Ti} = \frac{2}{A_{Ti} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{48 + \frac{2}{3}} = 0,041,$$
$$\Sigma_a^{Ti} = \sigma_a^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 3,43 \cdot 10^{-24} \cdot 0,00798 \cdot 10^{23} = 0,0027 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Ti} = \sigma_s^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 4,2 \cdot 10^{-24} \cdot 0,00798 \cdot 10^{23} = 0,00335 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Ti} = \sigma_{tr}^{Ti} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Ti} = 7,588 \cdot 10^{-24} \cdot 0,00798 \cdot 10^{23} = 0,006 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Ti} = 0,041 \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для марганца (Mn)

$$\sigma_a^{Mn} = 13,16 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{690,96}} \cdot 1,025 = 7,783 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{Mn} = 2,3 \text{ барн}, \qquad \mu_s^{Mn} = 0,01, \qquad \sigma_{tr}^{Mn} = 10,06 \text{ барн},$$
$$\xi_{Mn} = \frac{2}{A_{Mn} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{55 + \frac{2}{3}} = 0,0359,$$
$$\Sigma_a^{Mn} = \sigma_a^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 7,783 \cdot 10^{-24} \cdot 1,31 \cdot 10^{21} = 0,01 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_s^{Mn} = \sigma_s^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 2,3 \cdot 10^{-24} \cdot 1,31 \cdot 10^{21} = 0,003 \text{ см}^{-1},$$
$$\Sigma_{tr}^{Mn} = \sigma_{tr}^{Mn} \cdot 10^{-24} \cdot N_{Mn} = 10,06 \cdot 10^{-24} \cdot 1,31 \cdot 10^{21} = 0,013 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\Sigma_s^{Mn} = 0,0359 \cdot 0,003 = 1,077 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Микро- и макросечения для стали

$$\sigma_a^{сталь} = \sigma_a^{Fe} + \sigma_a^{Cr} + \sigma_a^{Ni} + \sigma_a^{Ti} + \sigma_a^{Mn} = 17,262 \text{ барн},$$
$$\sigma_s^{сталь} = \sigma_s^{Fe} + \sigma_s^{Cr} + \sigma_s^{Ni} + \sigma_s^{Ti} + \sigma_s^{Mn} = 39,1 \text{ барн},$$
$$\sigma_{tr}^{сталь} = \sigma_{tr}^{Fe} + \sigma_{tr}^{Cr} + \sigma_{tr}^{Ni} + \sigma_{tr}^{Ti} + \sigma_{tr}^{Mn} = 56,141 \text{ барн},$$

$$\sum_a^{сталь} = \sum_a^{Fe} + \sum_a^{Cr} + \sum_a^{Ni} + \sum_a^{Ti} + \sum_a^{Mn} = 0{,}1526 \text{ см}^{-1},$$
$$\sum_s^{сталь} = \sum_s^{Fe} + \sum_s^{Cr} + \sum_s^{Ni} + \sum_s^{Ti} + \sum_s^{Mn} = 0{,}889 \text{ см}^{-1},$$
$$\sum_{tr}^{сталь} = \sum_{tr}^{Fe} + \sum_{tr}^{Cr} + \sum_{tr}^{Ni} + \sum_{tr}^{Ti} + \sum_{tr}^{Mn} = 1{,}0352 \text{ см}^{-1},$$
$$\xi\sum_s^{\text{сталь}} = \xi\sum_s^{Fe} + \xi\sum_s^{Cr} + \xi\sum_s^{Ni} + \xi\sum_s^{Ti} + \xi\sum_s^{Mn} = 0{,}031 \text{ см}^{-1}.$$

С учетом пересчитанного сечения получаем усредненные сечения по ячейке:

$$\sum_a^{\text{яч}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \sum_{a\,i} \cdot S_i}{S_{\text{яч}}} = \frac{\sum_{a\,\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \sum_{a\,\text{зам}} \cdot S_{\text{зам}} + \sum_{a\,\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{яч}}} = 0{,}134 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi\sum_s^{\text{яч}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \sum_{s\,i} \cdot S_i}{S_{\text{яч}}} = \frac{\xi\sum_{s\,\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \xi\sum_{s\,\text{зам}} \cdot S_{\text{зам}} + \xi\sum_{s\,\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{яч}}} = 0{,}7604 \text{ см}^{-1},$$

Уточним $f_{\text{гр}}$:

$$f_{\text{гр}} = \frac{\Sigma_a^{\text{яч}}}{\xi\Sigma_s^{\text{яч}}} = \frac{0{,}134}{0{,}7604} = 0{,}176,$$

Для данной точки $\chi_{\text{гр}} = 5{,}9$. Так как $\chi_{\text{гр}}$ изменилась меньше чем на 1, то можно продолжить расчет. Определим $E_{\text{гр}}$ и $E_{\text{т}}$:

$$E_{\text{т}} = 0{,}86 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{н.г.}} = 0{,}86 \cdot 10^{-4} \cdot 690{,}96 = 0{,}0594 \text{ эВ},$$
$$E_{\text{гр}} = \chi_{\text{гр}} \cdot E_{\text{т}} = 5{,}9 \cdot 0{,}0594 = 0{,}3505 \text{ эВ}.$$

3.3.2. Расчет «горячего» реактора

Определение коэффициента размножения для бесконечной среды

Данные для расчета:

Макросечение поглощения в КМ ..... 0.1526 см^{-1}
Макросечение транспортное в КМ ..... 1.0352 см^{-1}
Макросечение поглощения воды ..... 0.0221 см^{-1}
Макросечение транспортное воды .....2.31 см^{-1}
Замедляющая способность воды .....1.35 см^{-1}
Замедляющая способность топлива ..... 0.0217 см^{-1}
Замедляющая способность КМ ..... 0.031 см^{-1}
Температура горючего (средняя) .....690.96 К
Плотность воды ..... 0.7679 $\text{г}/\text{см}^3$
Макросечение поглощения твэл ..... 0.266 см^{-1}

Макросечение поглощения топлива (урана) в твэл..... 0.266 $см^{-1}$
Транспортное макросечение твэл ..... 0.639 $см^{-1}$
Макросечение поглощения U-235..... 376.69 $см^{-1}$
Микросечение деления U-235 ..... 320.98 бн
Микросечение поглощения U-238 ..... 1.603 бн
Обогащение горючего по U-235..... 0.027
Пористость блока по U-238 ..... 0.4807
Нижнее значение величины шага твэл в кассете..... 1.23см
Верхнее значение величины шага твэл в кассете..... 1.23см
Интервал изменения шага решетки 1см
Нижнее значение внешнего радиуса твэл 0.445см
Верхнее значение внешнего радиуса твэл..... 0.445см
Интервал изменения радиуса твэл 1см
Площадь дополнительных материалов в ТК .....0 $см^2$
Толщина внешней оболочки твэл ..... 0.04 см
Толщина стенки кассеты..... 0.15 см
Толщина водного зазора между кассетами..... 0.3 см
Число твэл в крайнем ряду кассеты..... 7

Выходные данные программы:

Коэффициент размножения на тепловых нейтронах в топливе (η)..... 1.8249
Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (ε)..... 1.0310
Вероятность избежать резонансного захвата (φ) 0.7486
Коэффициент использования тепловых
нейтронов внутри фикт. блока (θ_0) 0.9045
Отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фикт.
блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов ($\theta_ф$).... 0.9474
Коэффициент использования тепловых нейтронов (θ) 0.8569
Коэффициент размножения для бесконечной среды (k_∞)..... 1.2068
Коэффициент экранировки (F)..... 1.0152

Расчет эффективного коэффициента размножения

Возраст тепловых нейтронов в уран-водных решетках найдем по экспериментальной формуле С.Н. Фейнберга:

$$\tau = \frac{\tau_{H_2O}}{\left(\gamma_{H_2O} \cdot \frac{V_{H_2O}}{V_{яч}}\right)\left[1 - \frac{V_{H_2O}}{V_{яч}} \cdot (1 - \gamma_{H_2O})\right]^{1.5}},$$

где τ_{H_2O} – возраст нейтронов воды при комнатной температуре ($T = 293$K) $\tau_{H_2O} = 27{,}3$ см^2; γ_{H_2O} – удельный вес при рабочей температуре теплоносителя ($\gamma_{H_2O} = 0{,}7679$ г/см^3).

$$V_{H_2O} = S_{H_2O} \cdot H = 93{,}9204 \cdot H,\ V_{яч} = S_{яч} \cdot H = 179{,}58 \cdot H,$$

$$\tau = \frac{27{,}3}{\left(0{,}7679 \cdot \frac{93{,}9204}{179{,}58}\right)\left[1 - \frac{93{,}9204}{179{,}58} \cdot (1 - 0{,}7679)\right]^{1.5}} = 82{,}55 \text{ см}^2.$$

Квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора, находящегося в рабочем состоянии, рассчитывается так же, как и для холодного реактора по формуле: $L^2_{гор} = L^2_{зам}(1 - и) + L^2_{бл} \cdot и$

$L^2_{зам}$ в зависимости от температуры T можно найти по следующей формуле:

$$L^2_{зам}\left(T_{зам}\right) = L^2_{зам}\left(T_0\right) \cdot \left(\frac{T_{зам}}{T_0}\right)^{0.48}$$

Длина диффузии тепловых нейтронов при температуре $T_0 = 293$ K равна: $L_{зам} = 2{,}72$ см, тогда

$$L^2_{зам}\left(543 \text{ К}\right) = L^2_{зам}\left(293\right) \cdot \left(\frac{543}{293}\right)^{0.48} = 9{,}948 \text{ см}^2.$$

Определим $L^2_{бл}$:

$$\sum_{a\,бл} = \frac{1}{S_{бл}} \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{a\,i} \cdot S_i = \frac{\sum_{a\,топл} \cdot S_{топл} + \sum_{a\,км} \cdot S_{км}}{S_{бл}} = 0{,}2934 \text{ см}^{-1},$$

$$\sum_{tr\,бл} = \frac{1}{S_{бл}} \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{tr\,i} \cdot S_i = \frac{\sum_{tr\,топл} \cdot S_{топл} + \sum_{tr\,км} \cdot S_{км}}{S_{бл}} = 0{,}8296 \text{ см}^{-1},$$

$$L^2_{бл} = \frac{1}{3 \cdot \sum_{a\,бл} \cdot \sum_{tr\,бл}} = \frac{1}{3 \cdot 0{,}2934 \cdot 0{,}8296} = 1{,}369 \text{ см}^2.$$

Таким образом квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора, находящегося в рабочем состоянии:

$$L^2_{гор} = 9{,}948 \cdot (1 - 0{,}8569) + 1{,}369 \cdot 0{,}8569 = 2{,}597 \text{ см}^2.$$

Геометрический параметр: $B^2 = 0{,}00035$ см$^{-2}$.

На основании полученных данных рассчитываем эффективный коэффициент размножения:

$$k_{эф} = \frac{1,2068 \cdot \exp\left[-0,00035 \cdot 82,55\right]}{1 + 0,00035 \cdot 2,597} = 1,191.$$

С учетом найденных значений $k_{эф}$(«холодный») и $k_{эф}$(«горячий») можно определить температурный коэффициент реактивности ТКР по следующей формуле:

$$\frac{\Delta K_{эф}}{\Delta T} = \frac{K_{эф}^{гор} - K_{эф}^{гор}}{\Delta T} = \frac{1,191 - 1,234}{270 - 20} = -1,72 \cdot 10^{-4}\ {}^{\circ}C^{-1}$$

4. Многогрупповой расчет, спектр и ценности нейтронов в активной зоне

Спектр нейтронов в ядерном реакторе представляет собой спектр нейтронного деления, смягченный эффектами неупругого и упругого замедления на тяжелых ядрах.

Эффективным методом расчета спектра нейтронов является многогрупповой метод, основная идея которого состоит в том, что вся область энергий нейтронов делится на конечное число интервалов – групп.

В пределах каждой группы сечения ядерных процессов считаются не зависящими от энергии нейтронов.

Предполагается, что для каждой группы могут быть рассмотрены односкоростное кинетическое уравнение в диффузионно-возрастном приближении и сопряженное ему уравнение ценностей нейтронов, описывающее баланс нейтронов и ценностей в объеме реактора. Приведенный многогрупповой расчет спектра нейтронов позволяет в дальнейшем эффективные двухгрупповые константы.

В дальнейшем будет принята следующая система обозначений:

m – общее число энергетических групп;

k, i, j – текущий индекс группы;

ε_j – доля нейтронов группы «j» в спектре деления $\int \varepsilon(U)\,dU = 1$;

D – коэффициент диффузии нейтронов, см;

Σ_a, Σ_f – макроскопические сечения поглощения и деления, см$^{-1}$, причем для делящегося изотопа $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c$;

Σ_{tr}^{k} – транспортное сечение группы «k», см$^{-1}$;

$\Sigma_{з}^{k}$ – полное сечение замедления группы «k» во все нижележащие группы см$^{-1}$;

$\Sigma_{з}^{ik}$ – сечение замедления группы «I» в группу «k» см$^{-1}$;

ν_f^j – выход нейтронов на одно деление в группе «j».

«Пересчет» концентраций ядер

Пересчет концентраций для многогруппового расчета производится по формуле:

$$N_i = N_j \cdot \frac{V_j}{V_{\text{яч}}}, \qquad (4.1)$$

где $\frac{V_j}{V_{\text{яч}}}$ – доля *j*-го элемента в ячейке,

V_j – объем элемента,

$V_{\text{яч}}$ – объем ячейки на 1 см высоты,

N_j – концентрация элемента, без учета его доли в ячейке.

Топливо:

$$N_{UO_2} = \gamma_{UO_2} \cdot \frac{Na}{M_{UO_2}} \cdot \frac{V_{\text{топл}}}{V_{\text{яч}}} = 10,2 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{270} \cdot \frac{78,3846}{179,58} = 0,993 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{U^5} = C_{U^5} \cdot \gamma_{UO_2} \cdot \frac{Na}{M_{UO_2}} \cdot \frac{V_{\text{топл}}}{V_{\text{яч}}} = 0,027 \cdot 10,2 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{270} \cdot \frac{78,3846}{179,58} = 0,0027 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{U^8} = (1 - C_{U^5}) \cdot \gamma_{UO_2} \cdot \frac{Na}{M_{UO_2}} \cdot \frac{V_{\text{топл}}}{V_{\text{яч}}} = 0,973 \cdot 10,2 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{270} \cdot \frac{78,3846}{179,58} = 0,097 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3},$$

$$N_O = 2 \cdot \gamma_{UO_2} \cdot \frac{Na}{M_{UO_2}} \cdot \frac{V_{\text{топл}}}{V_{\text{яч}}} = 2 \cdot 10,2 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{270} \cdot \frac{78,3846}{179,58} = 0,1986 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

Теплоноситель (замедлитель):

$$N_{H_2O} = \gamma_{H_2O} \cdot \frac{Na}{M_{H_2O}} \cdot \frac{V_{\text{т/н}}}{V_{\text{яч}}} = 1 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{18} \cdot \frac{92,5218}{179,58} = 0,172 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3},$$

$$N_H = 2 \cdot \gamma_{H_2O} \cdot \frac{Na}{M_{H_2O}} \cdot \frac{V_{\text{т/н}}}{V_{\text{яч}}} = 2 \cdot 1 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{18} \cdot \frac{92,5218}{179,58} = 0,345 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3},$$

$$N_O = 1 \cdot \gamma_{H_2O} \cdot \frac{Na}{M_{H_2O}} \cdot \frac{V_{\text{т/н}}}{V_{\text{яч}}} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{18} \cdot \frac{92,5218}{179,58} = 0,172 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

Конструкционные материалы:

В концентрации не учитываем Cr, Ti, Ni, Mn в силу малости доли в смеси

$$N_H = \gamma_{\text{сталь}} \cdot \frac{C_{Fe} \cdot Na}{A_{Fe}} \cdot \frac{V_{\text{км}}}{V_{\text{яч}}} = 7,95 \cdot \frac{0,707 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{56} \cdot \frac{8,70963}{179,58} = 0,0293 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

Многогрупповой расчет

Для каждого элемента рассчитываем:

$$\Sigma_a^k = N_i \cdot \left(\sigma_c^k + \sigma_f^k\right),\ \text{см}^{-1},$$

где N_i – ядерная концентрация; σ_c – сечение захвата; σ_f – сечение деления;

$$\Sigma_з^k = N_i \cdot \left(\sigma_{з(e)}^k + \sigma_{in}^k - \sigma_{in}^{kk}\right),\ \text{см}^{-1},$$

где y_{in}^k – сечение неупругого рассеяния при переходе в k-ю группу; σ_{in}^{kk} – сечение неупругого рассеяния не вызывающее ухода из этой группы;

$$\Sigma_{tr}^k = N_i \cdot \left(\sigma_e^k \cdot (1-\mu_e) + \sigma_f^k + \sigma_{in}^k + \sigma_c^k\right),\ \text{см}^{-1},$$

где σ_e^k – сечение упругого рассеяния; μ_e – средний косинус угла рассеяния;

$$\Sigma_f^k = N_i \cdot \sigma_f^k\ \ \text{см}^{-1},$$

$$\Sigma_{ув}^k = \Sigma_a^k + \Sigma_з^k\ \ \text{см}^{-1},$$

$$\Sigma^{i\to i+1} = N_i \cdot \left(\sigma_{з(e)}^k + \sigma_{in(i,i+1)}^k\right)\ \text{см}^{-1},\ \text{при } k = i+1,$$

$$\Sigma^{i\to i+k} = N_i \cdot \sigma_{in(i,i+k)}^k\ \ \text{см}^{-1},\ \text{при } k > i+1,$$

где $\sigma_{з(e)}^k$ – сечение упругого замедления из i-й группы в k-ю;

значения ε^k и ν_f^k берем из таблиц [3].

Кроме того учитываем поправку на самоэкранировку U^{238}:

$$\sigma_{0e} = \frac{\sum_{i=1}^{m\neq l} \sigma_{tm} \cdot N_{mi}}{N_c},\ \text{барн},$$

где σ_{tm}, N_{mi} – сечения и ядерная концентрация «m» элемента.

После определения σ_{0e} отыскиваем поправки к сечениям f_i. С учетом поправок находим $\sigma_i = \sigma_i \cdot f(\sigma_0)$.

В качестве примера определения констант приведем 5-ю группу:

Для определения поправки на самоэкранировку U^{238} рассчитаем:

$$\sigma_0^{U^8} = \frac{N_{U^5} \cdot \sigma_t^{U^5} + N_{Fe} \cdot \sigma_t^{Fe} + N_H \sigma_t^H + N_O \sigma_t^O}{N_{U^8}} =$$

$$= \frac{2,22 \cdot 10^{19} \cdot 7,7 + 6,05 \cdot 10^{22} \cdot 3,5 + 1,42 \cdot 10^{21} \cdot 2,2 + 2,73 \cdot 10^{21} \cdot 1,9}{9,89 \cdot 10^{20}} = 373,97 \text{ барн.}$$

Поправки: f_t, f_c, f_e равны 1.

Определим уход из группы:

За счет замедления:

U^{235}:

$$\sigma_з^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{з(in)}^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,031 + 1,38 - 0,2 = 1,211 \text{ барн.}$$

U^{238}:

$$\sigma_з^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{з(in)}^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,04 + 2,15 - 1,15 = 1,04 \text{ барн.}$$

Fe:

$$\sigma_з^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{з(in)}^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,12 + 0,37 - 0,01 = 0,48 \text{ барн.}$$

O:

$$\sigma_з^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{з(in)}^5 = \sigma_{з(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(3,3)} = 0,868 + 0 - 0 = 0,868 \text{ барн.}$$

H:

$$\sigma_з^5 = \sigma_{з(e)}^5 = 3,12 \text{ барн.}$$

За счет поглощения:

U^{235}:

$$\sigma_a^5 = \sigma_f^5 + \sigma_c^5 = 1,25 + 0,12 = 1,37 \text{ барн.}$$

U^{238}:

$$\sigma_a^5 = \sigma_f^5 + \sigma_c^5 = 0,02 + 0,13 = 0,15 \text{ барн.}$$

Fe:

$$\sigma_a^5 = 0,004 \text{ барн.}$$

O:

$$\sigma_a^5 = 0 \text{ барн.}$$

H:

$$\sigma_a^3 = 0 \text{ барн.}$$

Для всех элементов считаем $\Sigma_{\text{ув}_l}^i = (\sigma_{al}^i + \sigma_{з_l}^i) \cdot N_l$.

Таким образом для 5-й группы получаем:

$$\Sigma_{\text{ув}}^5 = \Sigma_{\text{ув}U^5}^5 + \Sigma_{\text{ув}U^8}^5 + \Sigma_{\text{ув}Fe}^5 + \Sigma_{\text{ув}o}^5 + \Sigma_{\text{ув}H}^5 = 0,1534 \text{ см}^{-1}.$$

Транспортные параметры:

U^{235}:

$$\sigma_{tr}^5 = \sigma_e^5 \cdot \left(1 - \mu_e^5\right) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{in}^5 = 3,85 \cdot \left(1 - 0,45\right) + 0,12 + 1,25 + 1,38 = 4,8675 \text{ барн.}$$

U^{238}:

$$\sigma_{tr}^5 = \sigma_e^5 \cdot \left(1 - \mu_e^5\right) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{in}^5 = 4,6 \cdot \left(1 - 0,42\right) + 0,13 + 0,02 + 2,15 = 4,968 \text{ барн.}$$

Fe:

$$\sigma_{tr}^5 = \sigma_e^5 \cdot \left(1 - \mu_e^5\right) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{in}^5 = 3,85 \cdot \left(1 - 0,24\right) + 0,004 + 0 + 0,37 = 3,3 \text{ барн.}$$

O:

$$\sigma_{tr}^5 = \sigma_e^5 \cdot \left(1 - \mu_e^5\right) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{in}^5 = 4,3 \cdot \left(1 - 0,08\right) + 0 + 0 + 0 = 3,956 \text{ барн.}$$

H:

$$\sigma_{tr}^5 = \sigma_e^5 \cdot \left(1 - \mu_e^5\right) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{in}^5 = 4,1 \cdot \left(1 - 0,667\right) + 0 + 0 + 0 = 1,3653 \text{ барн.}$$

В результате для 5-й группы:

$$\Sigma_{tr}^5 = \Sigma_{tr_{U^5}}^5 + \Sigma_{tr_{U^8}}^5 + \Sigma_{tr_{Fe}}^5 + \Sigma_{tr_O}^5 + \Sigma_{tr_H}^5 = 0,252677 \text{ см}^{-1}$$

$$D^3 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^3} = 1,3192 \text{ см.}$$

Результаты сведены в таблицу «многогрупповые константы» (приложение 4).

Рассчитаем поток и ценность для 5-й группы:

$$I^5 = \frac{\varepsilon_3 + \Sigma_3^{1\to5} \cdot I^1 + \Sigma_3^{2\to5} \cdot I^2 + \Sigma_3^{3\to5} \cdot I^3 + \Sigma_3^{4\to5} \cdot I^4}{B^2 \cdot D_5 + \Sigma_{\text{ув}}^5} =$$

$$= \frac{0,202 + 0,0126 \cdot 0,1581 + 0,0149 \cdot 0,9209 + 0,0213 \cdot 1,9534 + 0,051 \cdot 3,2132}{0,000352 \cdot 1,3192 + 0,1534} = 2,7519,$$

$$I_5^+ = \frac{\nu_f^5 \cdot \Sigma_f^5 + \sum_{i=6}^{26} \Sigma_3^{5\to i} I_i^+}{B^2 \cdot D_5 + \Sigma_{\text{ув}}^5} = \frac{0,00134 + 0,1832}{0,000352 \cdot 1,3192 + 0,1256} = 1,1991.$$

Все результаты расчетов сводятся в таблицу. Проверка потоков сводится к проверке условия $K_{эф} = K_{эф}^+$, т. е. $\sum_{j=1}^{m} \nu_f^j \Sigma_f^j I^j = \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j I_j^+ = 1,2468.$

Определение параметров двухгруппового расчета

Рассчитанные спектры потоков и ценностей нейтронов в активной зоне позволяют составить константы для последующего расчета пространственного распределения нейтронных потоков.

При этом выделяется тепловая группа – последняя группа, а все остальные группы объединяются в одну группу быстрых нейтронов, т. е. соответствующие потоки и ценности определяются так:

$$I^{\text{т}} = I^{26} = 4{,}96 \qquad I_T^+ = I_{26}^+ = 1{,}74,$$

$$I_{\text{б}} = \sum_{i=1}^{25} I_i = 30{,}42 \qquad I_{\text{б}}^+ = \sum_{i=1}^{25} I_i^+ = 33{,}42,$$

Усредненные константы рассчитываются по формулам:

$$D_{\text{б}} = \frac{\sum_{i=1}^{25} D_i I_i I_i^+}{\sum_{i=1}^{25} I_i I_i^+} = 1{,}134 \text{ см}, \qquad \Sigma_{\text{ув}}^{\text{б}} = \frac{\sum_{k=1}^{25} I_k^+ \left[(\Sigma_a^k + \Sigma_{\text{з}}^k) I_\kappa - \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_{\text{з}}^{ik} I^i \right]}{\sum_{k=1}^{25} I_k I_k^+} = 0{,}032,$$

$$D^{\text{т}} = D^{26} = 0{,}455 \text{ см}, \qquad \sum_a^{\text{т}} = \sum_a^{26} = 0{,}106 \text{ см},$$

$$\Sigma_{\text{з}}^{\text{б т}} = \frac{\sum_{k=1}^{25} \Sigma_{\text{з}}^{i26} I_k I_k^+}{\sum_{k=1}^{25} I_k I_k^+} = 0{,}023,$$

$$(\nu_f \Sigma_f)_{\text{б}} = \frac{\sum_{i=1}^{25} \nu_f^i \Sigma_f^i I_i I_i^+}{\sum_{i=1}^{25} I_i I_i^+} = 0{,}0119, \qquad (\nu_f \Sigma_f)_{\text{т}} = \nu_f^{26} \Sigma_f^{26} = 0{,}185,$$

$$\tau = \frac{D_{\text{б}}}{\Sigma_{\text{ув}}^{\text{б}} - (\nu_f \Sigma_f)_{\text{б}}} = 55{,}403 \text{ см}^2, \qquad L^2 = \frac{D_{\text{т}}}{\Sigma_{a_{\text{т}}}} = 4{,}281 \text{ см}^2.$$

Приложение 2

Параметры оптимизации «холодного» реактора

Число вторичных нейтронов на один акт деления – 1,8334

$R_{твэл}$	ε	φ	θ_0	$\theta_ф$	θ	k_∞	F	$S_{топ}$	$S_{т/н}$	$S_{км}$	$\theta_{гом}$
Шаг решетки: 1,00											
0,4150	1,0464	0,6116	0,9059	0,9886	0,8956	1,0508	1,0193	0,5411	0,3647	0,1000	0,8723
0,4250	1,0508	0,5764	0,9089	0,9928	0,9023	1,0020	1,0201	0,5674	0,3370	0,1012	0,8789
0,4350	1,0557	0,5370	0,9116	0,9969	0,9088	0,9445	1,0210	0,5945	0,3087	0,1025	0,8852
0,4450	1,0613	0,4927	0,9143	1,0007	0,9149	0,8771	1,0219	0,6221	0,2798	0,1037	0,8912
0,4550	1,0677	0,4427	0,9168	1,0044	0,9208	0,7979	1,0227	0,6504	0,2503	0,1050	0,8968
0,4650	1,0751	0,3861	0,9192	1,0078	0,9264	0,7051	1,0236	0,6793	0,2201	0,1062	0,9022
0,4750	1,0839	0,3224	0,9214	1,0112	0,9317	0,5970	1,0246	0,7088	0,1894	0,1075	0,9073
0,4850	1,0943	0,2513	0,9236	1,0143	0,9368	0,4724	1,0255	0,7390	0,1579	0,1088	0,9122
0,4950	1,1069	0,1743	0,9256	1,0174	0,9417	0,3330	1,0265	0,7698	0,1259	0,1100	0,9169
Шаг решетки: 1,05											
0,4150	1,0401	0,6690	0,9041	0,9807	0,8867	1,1312	1,0194	0,5411	0,4485	0,1021	0,8633
0,4250	1,0435	0,6415	0,9071	0,9853	0,8938	1,0969	1,0202	0,5674	0,4209	0,1033	0,8702
0,4350	1,0473	0,6109	0,9100	0,9896	0,9005	1,0564	1,0211	0,5945	0,3926	0,1046	0,8768
0,4450	1,0515	0,5770	0,9127	0,9937	0,9070	1,0088	1,0219	0,6221	0,3637	0,1058	0,8830
0,4550	1,0563	0,5391	0,9153	0,9977	0,9131	0,9533	1,0228	0,6504	0,3342	0,1071	0,8889
0,4650	1,0616	0,4966	0,9177	1,0014	0,9190	0,8883	1,0237	0,6793	0,3040	0,1083	0,8945
0,4750	1,0678	0,4489	0,9200	1,0050	0,9246	0,8125	1,0246	0,7088	0,2732	0,1096	0,8999
0,4850	1,0749	0,3951	0,9222	1,0084	0,9300	0,7241	1,0256	0,7390	0,2418	0,1109	0,9050
0,4950	1,0831	0,3347	0,9243	1,0117	0,9351	0,6214	1,0265	0,7698	0,2098	0,1121	0,9099
Шаг решетки: 1,09											
0,4150	1,0352	0,7134	0,9023	0,9726	0,8776	1,1884	1,0194	0,5411	0,5359	0,1042	0,8542
0,4250	1,0380	0,6912	0,9054	0,9775	0,8850	1,1642	1,0203	0,5674	0,5083	0,1054	0,8614
0,4350	1,0410	0,6668	0,9084	0,9821	0,8921	1,1354	1,0211	0,5945	0,4800	0,1067	0,8682
0,4450	1,0444	0,6400	0,9111	0,9865	0,8988	1,1015	1,0220	0,6221	0,4511	0,1079	0,8747
0,4550	1,0481	0,6104	0,9138	0,9907	0,9053	1,0619	1,0229	0,6504	0,4216	0,1092	0,8809
0,4650	1,0522	0,5776	0,9162	0,9947	0,9114	1,0156	1,0238	0,6793	0,3914	0,1104	0,8867
0,4750	1,0568	0,5412	0,9186	0,9985	0,9173	0,9617	1,0247	0,7088	0,3606	0,1117	0,8923
0,4850	1,0620	0,5004	0,9209	1,0022	0,9229	0,8992	1,0256	0,7390	0,3292	0,1130	0,8976
0,4950	1,0679	0,4547	0,9230	1,0057	0,9283	0,8264	1,0266	0,7698	0,2972	0,1142	0,9027
Шаг решетки: 1,14											
0,4150	1,0314	0,7486	0,9006	0,9642	0,8683	1,2293	1,0195	0,5411	0,6268	0,1063	0,8450
0,4250	1,0337	0,7303	0,9037	0,9694	0,8761	1,2125	1,0203	0,5674	0,5992	0,1075	0,8524
0,4350	1,0362	0,7104	0,9067	0,9743	0,8834	1,1922	1,0212	0,5945	0,5709	0,1088	0,8595
0,4450	1,0390	0,6886	0,9096	0,9790	0,8905	1,1680	1,0220	0,6221	0,5420	0,1100	0,8663
0,4550	1,0419	0,6649	0,9122	0,9835	0,8972	1,1395	1,0229	0,6504	0,5125	0,1113	0,8727
0,4650	1,0452	0,6388	0,9148	0,9877	0,9036	1,1061	1,0238	0,6793	0,4823	0,1125	0,8788
0,4750	1,0488	0,6101	0,9172	0,9918	0,9097	1,0673	1,0247	0,7088	0,4515	0,1138	0,8846
0,4850	1,0528	0,5784	0,9195	0,9957	0,9156	1,0222	1,0257	0,7390	0,4201	0,1150	0,8902
0,4950	1,0573	0,5432	0,9217	0,9995	0,9212	0,9700	1,0266	0,7698	0,3881	0,1163	0,8955

Шаг решетки: 1,18
0,4150 1,0284 0,7771 0,8988 0,9556 0,8589 1,2584 1,0196 0,5411 0,7212 0,1083 0,8357
0,4250 1,0303 0,7617 0,9020 0,9611 0,8669 1,2473 1,0204 0,5674 0,6936 0,1096 0,8434
0,4350 1,0324 0,7450 0,9051 0,9663 0,8746 1,2334 1,0212 0,5945 0,6653 0,1109 0,8508
0,4450 1,0347 0,7271 0,9080 0,9712 0,8819 1,2163 1,0221 0,6221 0,6364 0,1121 0,8577
0,4550 1,0372 0,7075 0,9107 0,9760 0,8889 1,1959 1,0230 0,6504 0,6069 0,1134 0,8644
0,4650 1,0399 0,6863 0,9133 0,9805 0,8956 1,1718 1,0239 0,6793 0,5767 0,1146 0,8708
0,4750 1,0428 0,6632 0,9158 0,9849 0,9020 1,1436 1,0248 0,7088 0,5459 0,1159 0,8768
0,4850 1,0460 0,6378 0,9182 0,9890 0,9081 1,1107 1,0257 0,7390 0,5145 0,1171 0,8826
0,4950 1,0495 0,6099 0,9204 0,9930 0,9140 1,0727 1,0267 0,7698 0,4825 0,1184 0,8881

Шаг решетки: 1,23
0,4150 1,0258 0,8006 0,8971 0,9467 0,8493 1,2787 1,0196 0,5411 0,8191 0,1104 0,8263
0,4250 1,0275 0,7874 0,9004 0,9525 0,8576 1,2721 1,0205 0,5674 0,7915 0,1117 0,8343
0,4350 1,0293 0,7733 0,9035 0,9580 0,8655 1,2631 1,0213 0,5945 0,7632 0,1130 0,8419
0,4450 1,0313 0,7581 0,9064 0,9633 0,8731 1,2516 1,0222 0,6221 0,7343 0,1142 0,8491
0,4550 1,0334 0,7417 0,9092 0,9683 0,8804 1,2373 1,0230 0,6504 0,7048 0,1155 0,8560
0,4650 1,0356 0,7241 0,9119 0,9731 0,8874 1,2200 1,0240 0,6793 0,6746 0,1167 0,8626
0,4750 1,0381 0,7050 0,9144 0,9777 0,8940 1,1995 1,0249 0,7088 0,6438 0,1180 0,8689
0,4850 1,0407 0,6842 0,9168 0,9821 0,9004 1,1755 1,0258 0,7390 0,6124 0,1192 0,8749
0,4950 1,0436 0,6616 0,9191 0,9863 0,9065 1,1476 1,0268 0,7698 0,5804 0,1205 0,8806

Шаг решетки: 1,27
0,4150 1,0237 0,8202 0,8953 0,9377 0,8395 1,2924 1,0197 0,5411 0,9206 0,1125 0,8168
0,4250 1,0252 0,8088 0,8987 0,9437 0,8481 1,2893 1,0205 0,5674 0,8929 0,1138 0,8251
0,4350 1,0268 0,7966 0,9019 0,9495 0,8564 1,2843 1,0214 0,5945 0,8646 0,1151 0,8330
0,4450 1,0285 0,7836 0,9049 0,9551 0,8642 1,2770 1,0222 0,6221 0,8357 0,1163 0,8405
0,4550 1,0303 0,7697 0,9077 0,9604 0,8718 1,2675 1,0231 0,6504 0,8062 0,1176 0,8476
0,4650 1,0322 0,7548 0,9105 0,9654 0,8790 1,2555 1,0240 0,6793 0,7761 0,1188 0,8544
0,4750 1,0343 0,7387 0,9130 0,9703 0,8859 1,2410 1,0249 0,7088 0,7453 0,1201 0,8609
0,4850 1,0365 0,7214 0,9155 0,9749 0,8925 1,2236 1,0259 0,7390 0,7138 0,1213 0,8671
0,4950 1,0389 0,7026 0,9178 0,9794 0,8989 1,2031 1,0268 0,7698 0,6818 0,1226 0,8731

Шаг решетки: 1,32
0,4150 1,0220 0,8368 0,8936 0,9284 0,8296 1,3007 1,0197 0,5411 1,0255 0,1146 0,8073
0,4250 1,0233 0,8268 0,8970 0,9348 0,8385 1,3007 1,0206 0,5674 0,9978 0,1159 0,8158
0,4350 1,0247 0,8162 0,9003 0,9409 0,8470 1,2988 1,0214 0,5945 0,9696 0,1171 0,8240
0,4450 1,0262 0,8049 0,9033 0,9467 0,8552 1,2951 1,0223 0,6221 0,9407 0,1184 0,8317
0,4550 1,0277 0,7929 0,9063 0,9522 0,8630 1,2893 1,0232 0,6504 0,9111 0,1197 0,8391
0,4650 1,0294 0,7801 0,9090 0,9576 0,8705 1,2816 1,0241 0,6793 0,8810 0,1209 0,8461
0,4750 1,0312 0,7664 0,9117 0,9627 0,8776 1,2716 1,0250 0,7088 0,8502 0,1222 0,8528
0,4850 1,0331 0,7516 0,9142 0,9676 0,8845 1,2593 1,0259 0,7390 0,8188 0,1234 0,8593
0,4950 1,0352 0,7358 0,9165 0,9723 0,8911 1,2445 1,0269 0,7698 0,7867 0,1247 0,8654

Шаг решетки: 1,36
0,4150 1,0204 0,8511 0,8918 0,9190 0,8196 1,3050 1,0198 0,5411 1,1339 0,1167 0,7978
0,4250 1,0216 0,8422 0,8953 0,9256 0,8288 1,3074 1,0206 0,5674 1,1063 0,1180 0,8065
0,4350 1,0229 0,8329 0,8987 0,9320 0,8375 1,3082 1,0215 0,5945 1,0780 0,1192 0,8149
0,4450 1,0242 0,8230 0,9018 0,9381 0,8460 1,3073 1,0224 0,6221 1,0491 0,1205 0,8229
0,4550 1,0256 0,8125 0,9048 0,9439 0,8540 1,3047 1,0232 0,6504 1,0196 0,1218 0,8305

0,4650 1,0271 0,8013 0,9076 0,9495 0,8618 1,3003 1,0241 0,6793 0,9894 0,1230 0,8377
0,4750 1,0286 0,7894 0,9103 0,9549 0,8692 1,2941 1,0251 0,7088 0,9586 0,1243 0,8447
0,4850 1,0303 0,7768 0,9128 0,9600 0,8763 1,2858 1,0260 0,7390 0,9272 0,1255 0,8513
0,4950 1,0321 0,7632 0,9153 0,9649 0,8832 1,2755 1,0270 0,7698 0,8952 0,1268 0,8577

Шаг решетки: 1,41
0,4150 1,0191 0,8634 0,8901 0,9094 0,8095 1,3058 1,0199 0,5411 1,2459 0,1188 0,7882
0,4250 1,0202 0,8555 0,8937 0,9163 0,8189 1,3104 1,0207 0,5674 1,2182 0,1201 0,7972
0,4350 1,0213 0,8472 0,8971 0,9230 0,8279 1,3134 1,0215 0,5945 1,1899 0,1213 0,8058
0,4450 1,0225 0,8384 0,9003 0,9293 0,8366 1,3150 1,0224 0,6221 1,1610 0,1226 0,8140
0,4550 1,0238 0,8292 0,9033 0,9354 0,8449 1,3150 1,0233 0,6504 1,1315 0,1238 0,8218
0,4650 1,0251 0,8193 0,9062 0,9412 0,8529 1,3134 1,0242 0,6793 1,1014 0,1251 0,8293
0,4750 1,0265 0,8089 0,9089 0,9468 0,8606 1,3102 1,0251 0,7088 1,0706 0,1264 0,8365
0,4850 1,0280 0,7979 0,9115 0,9522 0,8680 1,3052 1,0261 0,7390 1,0392 0,1276 0,8433
0,4950 1,0295 0,7862 0,9140 0,9574 0,8750 1,2985 1,0270 0,7698 1,0071 0,1289 0,8499

Шаг решетки: 1,45
0,4150 1,0180 0,8741 0,8884 0,8997 0,7992 1,3039 1,0199 0,5411 1,3613 0,1209 0,7786
0,4250 1,0190 0,8670 0,8920 0,9069 0,8089 1,3103 1,0208 0,5674 1,3337 0,1222 0,7878
0,4350 1,0200 0,8596 0,8955 0,9138 0,8182 1,3153 1,0216 0,5945 1,3054 0,1234 0,7967
0,4450 1,0211 0,8518 0,8987 0,9204 0,8272 1,3189 1,0225 0,6221 1,2765 0,1247 0,8051
0,4550 1,0222 0,8435 0,9018 0,9267 0,8357 1,3211 1,0234 0,6504 1,2470 0,1259 0,8131
0,4650 1,0234 0,8348 0,9047 0,9328 0,8440 1,3219 1,0243 0,6793 1,2168 0,1272 0,8208
0,4750 1,0246 0,8256 0,9075 0,9387 0,8519 1,3212 1,0252 0,7088 1,1860 0,1285 0,8282
0,4850 1,0259 0,8159 0,9102 0,9443 0,8595 1,3190 1,0261 0,7390 1,1546 0,1297 0,8353
0,4950 1,0273 0,8056 0,9127 0,9497 0,8668 1,3152 1,0271 0,7698 1,1226 0,1310 0,8420

Параметры оптимизации «горячего» реактора

Число вторичных нейтронов на один акт деления – 1,8249

$R_{твэл}$	ε	φ	θ_0	$\theta_ф$	θ	k_∞	F	$S_{топ}$	$S_{т/н}$	$S_{км}$	$\theta_{гом}$

Шаг решетки: 1,23
0,4450 1,0310 0,7486 0,9045 0,9474 0,8569 1,2068 1,0152 0,6221 0,7454 0,1144 0,8298

Рис. 3. $K_{беск}=f(R_{ТВЭЛ})$ при a=const

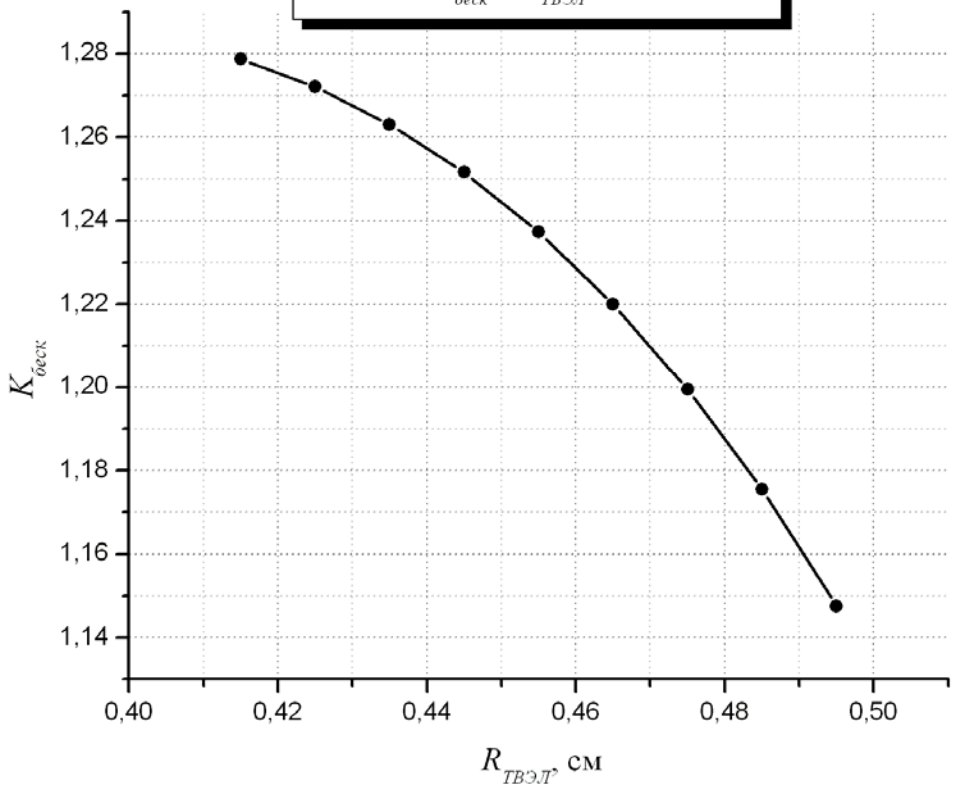
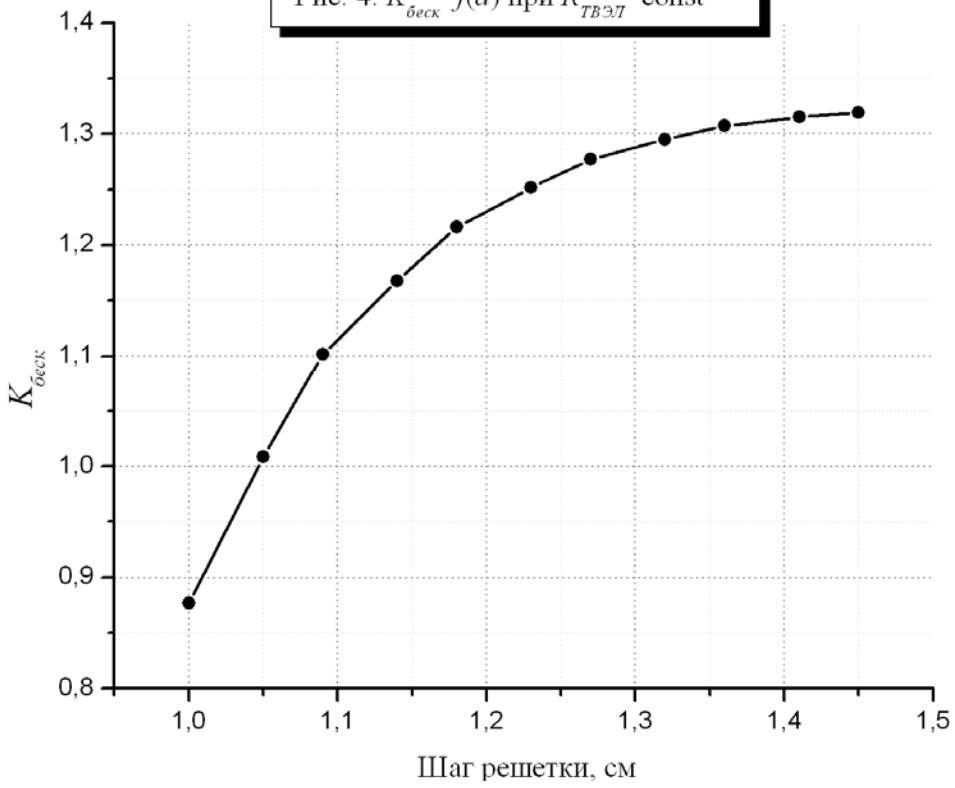


Рис. 4. $K_{беск}=f(a)$ при $R_{ТВЭЛ}$=const



Приложение 4

Таблица многогрупповых констант

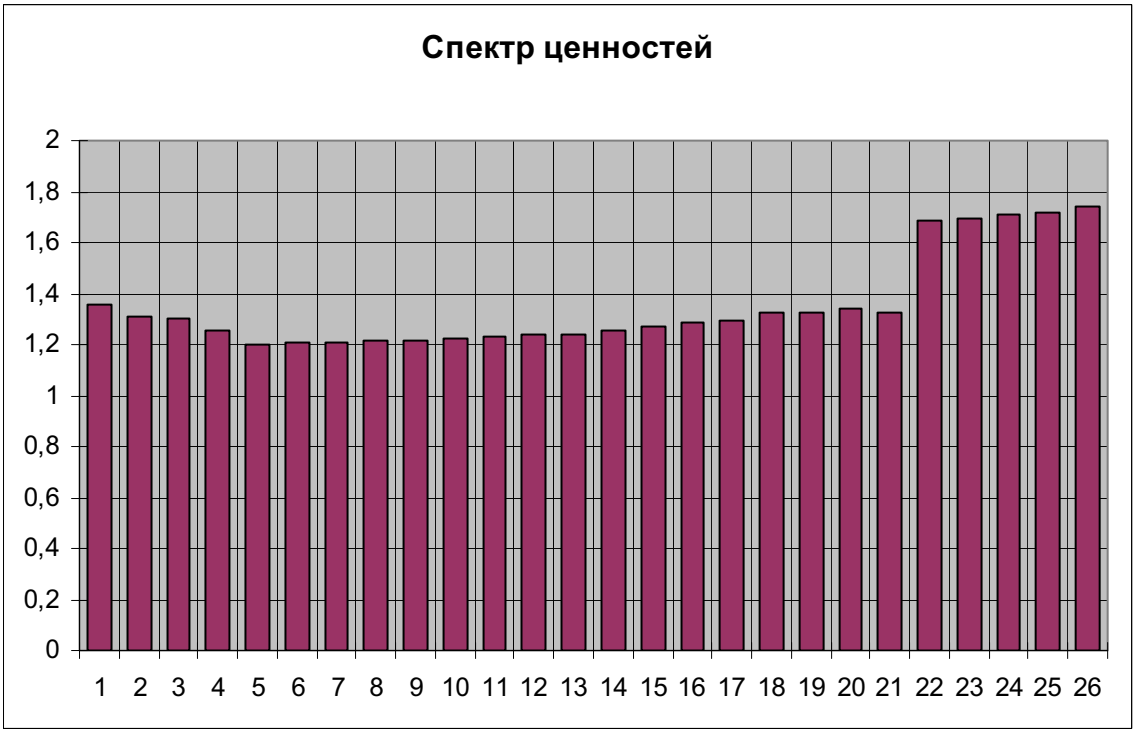
№	$\Sigma_{а\,(А3)}$	$\Sigma_{з\,(А3)}$	$\Sigma_{ув}$	$\Sigma_{tr\,(А3)}$	$D_{см}$	$\Sigma_{f\,(А3)}$	ε	ν	I	I^{+}
1	0.018764	0.073205	0.091968	0.1891	3.886442	0.010129	0.016	3.47629	0.158127	1.3542316
2	0.008809	0.089843	0.098653	0.242	3.127331	0.005911	0.088	3.08739	0.920855	1.3095081
3	0.006259	0.103965	0.110224	0.3228	2.510297	0.005938	0.184	2.86548	1.953417	1.3012509
4	0.005681	0.114289	0.119969	0.2762	2.254073	0.005076	0.27	2.66729	3.213178	1.2530979
5	0.001828	0.151585	0.153413	0.3042	1.319209	0.000528	0.202	2.54194	2.751945	1.1991457
6	0.001646	0.175801	0.177447	0.3951	1.131114	0.00033	0.141	2.46	3.037573	1.2045475
7	0.001911	0.232317	0.234228	0.4528	1.025435	0.000378	0.061	2.47	2.301708	1.2104799
8	0.002706	0.301526	0.304223	0.5293	0.887292	0.000456	0.024	2.45	1.680661	1.2144267
9	0.004125	0.360673	0.364798	0.6519	0.769134	0.000563	0.01	2.44	1.436036	1.2180754
10	0.005427	0.424271	0.429698	1.2143	0.698791	0.00071	0.003	2.43	1.192659	1.22361
11	0.007008	0.468086	0.475094	0.6017	0.651841	0.000911	0.001	2.42	1.063156	1.229492
12	0.008686	0.489824	0.498509	0.8678	0.614770	0.001179	0	2.42	1.002745	1.2363341
13	0.011756	0.500191	0.511947	0.7196	0.588729	0.001447	0	2.42	0.968262	1.2426608
14	0.016100	0.507364	0.523464	0.8158	0.571498	0.001956	0	2.42	0.932478	1.2514272
15	0.019355	0.508079	0.527434	0.9695	0.539658	0.002948	0	2.42	0.906129	1.2667962
16	0.018756	0.511084	0.529841	1.0268	0.596208	0.004288	0	2.42	0.885706	1.2887778
17	0.031109	0.516297	0.547407	1.0655	0.319336	0.005896	0	2.42	0.839902	1.2934921
18	0.031287	0.515748	0.547035	1.0558	0.492045	0.00938	0	2.42	0.819173	1.3270115
19	0.053386	0.521737	0.575123	1.0758	0.266631	0.01206	0	2.42	0.751996	1.3266939
20	0.078810	0.517119	0.595929	1.0799	0.391904	0.01206	0	2.42	0.691574	1.33837
21	0.161605	0.515110	0.676716	1.1098	0.444561	0.009916	0	2.42	0.562133	1.32374
22	0.014132	0.514057	0.528189	1.0561	0.659114	0.00536	0	2.42	0.623842	1.6836814
23	0.019889	0.514060	0.533949	1.0632	0.647683	0.00938	0	2.42	0.608936	1.6955349
24	0.029079	0.514063	0.543142	1.0737	0.631119	0.017152	0	2.42	0.586177	1.7101454
25	0.064932	0.514066	0.578998	1.0906	0.587698	0.04154	0	2.42	0.533451	1.7171454
26	0.106266	0	0.106266	1.2473	0.454976	0.076487	0	2.42	4.963505	1.7392211

Приложение 5

Таблица переходов

№	Из 1	Из 2	Из 3	Из 4	Из 5	Из 6	Из 7	Из 8	Из 9	Из 10	Из 11	Из 12	Из 13	Из 14	Из 15	Из 16	Из 17	Из 18	Из 19	Из 20	Из 21	Из 22	Из 23	Из 24	Из 25
1																									
2	0.0239																								
3	0.0107	0.0339																							
4	0.0131	0.0178	0.047																						
5	0.0126	0.0149	0.0213	0.0511																					
6	0.0114	0.0126	0.0183	0.0312	0.0922																				
7	0.006	0.0064	0.0096	0.0158	0.0307	0.1054																			
8	0.0023	0.0025	0.0045	0.0075	0.0149	0.0357	0.1318																		
9	0.0008	0.001	0.0019	0.0036	0.0076	0.0193	0.0544	0.1744																	
10	0.0003	0.0004	0.0008	0.0015	0.0034	0.009	0.0253	0.0685	0.2038																
11	0.0001	0.0001	0.0003	0.0007	0.0016	0.0041	0.0117	0.0317	0.0841	0.2384															
12		0.0001	0.0001	0.0003	0.0007	0.0019	0.0054	0.0147	0.0389	0.0994	0.2618														
13			7E-05	0.0001	0.0003	0.0009	0.0025	0.0069	0.0181	0.0462	0.1108	0.2732													
14				0.0001	0.0001	0.0004	0.0012	0.0028	0.0084	0.0214	0.0514	01156	0.2783												
15					0.0001	0.0002	0.0006	0.0015	0.0039	0.0099	0.0239	0.0537	0.118	0.2825											
16						0.0001	0.0002	0.0007	0.0018	0.0046	0.0111	0.0249	0.0548	0.1198	0.2845										
17							0.0001	0.0003	0.0008	0.0021	0.0051	0.0116	0.0254	0.0556	0.1204	0.2854									
18								0.0003	0.0004	0.001	0.0024	0.0054	0.0118	0.0258	0.0559	0.121	0.2906								
19									0.0003	0.0004	0.0011	0.0025	0.0055	0.012	0.0259	0.0562	0.121	0.2878							
20										0.0004	0.0005	0.0011	0.0026	0.0056	0.012	0.0261	0.0562	0.1216	0.2938						
21											0.0004	0.0006	0.0012	0.0026	0.0056	0.0121	0.0261	0.0564	0.1216	0.2892					
22												0.0004	0.0004	0.0012	0.0026	0.0056	0.0121	0.0262	0.0564	0.1216	0.287				
23													0.0005	0.0006	0.0012	0.0026	0.0056	0.0121	0.0262	0.0564	0.122	0.286			
24														0.0005	0.0006	0.0012	0.0026	0.0057	0.0121	0.0262	0.056	0.122	0.286		
25															0.0005	0.0006	0.0012	0.0026	0.0057	0.0121	0.026	0.056	0.122	0.286	
26																0.0005	0.001	0.0023	0.0049	0.0106	0.023	0.049	0.105	0.227	0.5131

Спектр потоков
6
5
4
3
2
1
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26


Спектр ценностей
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ
Часть 2. (пример)

1. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов. Уточнение эффективного коэффициента размножения

Уравнения баланса быстрых и тепловых нейтронов для активной зоны имеет вид:

$$D_{\text{т}}\nabla^2\Phi_{\text{т}} - \Sigma_{a\text{т}}\Phi_{\text{т}} + \varphi\Sigma_{\text{б}}\Phi_{\text{б}} = 0;$$

$$D_{\text{б}}\nabla^2\Phi_{\text{т}} - \Sigma_{\text{б}}\Phi_{\text{б}} + \frac{k_\infty}{\varphi}\Sigma_{a\text{т}}\Phi_{\text{т}} = 0; \qquad (1.1)$$

$$\Sigma_{\text{б}} = \frac{D_{\text{б}}}{\text{ф}};\ \Sigma_{a\text{т}} = \frac{D_{\text{б}}}{L_{\text{т}}^2}.$$

Для тех зон реактора, где нет горючего (например, отражатель), в уравнениях следует приравнивать нулю члены, содержащие k_∞.

Общие решения уравнений (1.1) для двухзонного реактора (активная зона + отражатель) могут быть представлены следующим образом:

1) активная зона:

$$\Phi_{\text{б}} = A\,J_0(\mu r) + B\,I_0(\nu r);$$

$$\Phi_{\text{т}} = S_1 A\,J_0(\mu r) + S_2 B\,I_0(\nu r); \qquad (1.2)$$

2) отражатель:

$$\Phi_{\text{б}} = C\,Z_2;$$

$$\Phi_{\text{т}} = D\,Z_1 + S_3\,C\,Z_2, \qquad (1.3)$$

где A, B, C, D – постоянные; $J_0(\mu r)$, $I_0(\nu r)$ – функции Бесселя нулевого порядка действительного и мнимого аргумента соответственно. Здесь приняты следующие обозначения:

$$\mu = \sqrt{\chi_1^2 - \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}\ \text{см}^{-1};\ a_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{отр}}^2} + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}\ \text{см}^{-1}; \qquad (1.4)$$

$$\nu = \sqrt{\chi_2^2 - \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}\ \text{см}^{-1};\ a_1 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{\text{отр}}} + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2}\ \text{см}^{-1}; \qquad (1.5)$$

$$\chi_{1,2}^2 = \mp\frac{1}{2}\left(\frac{1}{L_{\text{а.з.}}^2} + \frac{1}{\tau}\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{L_{\text{а.з.}}^2} + \frac{1}{\tau}\right)^2 + \frac{k'_\infty - 1}{L_{\text{а.з.}}^2\tau}}\ \text{см}^{-2}; \qquad (1.6)$$

$$S_1 = \frac{D_б\,\varphi}{\tau\, D_т}\cdot\frac{1}{\dfrac{1}{L^2_{а.з.}}+\chi_1^2};\ S_2 = \frac{D_б\,\varphi}{\tau\, D_т}\cdot\frac{1}{\dfrac{1}{L^2_{а.з.}}-\chi_2^2}; \tag{1.7}$$

$$S_3 = \frac{D_{б.отр}\,L^2_{отр}}{D_{т.отр}(\tau_{тр}-L^2_{отр})};\ R_{экв} = R_{а.з.}+T \text{ см}; \tag{1.8}$$

$$z = \left[I_0(ar) - \frac{I_0}{k_0}(a\,R_{экв})\,k_0(ar) \right]. \tag{1.9}$$

Условия «сшивки» потоков и токов на границе между активной зоной и отражателем приводит к системе из четырех уравнений с четырьмя неизвестными коэффициентами A, B, C, D.

Для совместности решения этого уравнения необходимо и достаточно, чтобы определитель матрицы, состоящей из коэффициентов при A, B, C, D, обратился в нуль.

$$\begin{vmatrix} J_0(\mu R_{а.з.}) & I_0(\nu R_{а.з.}) & -z_2(a_2 R_{а.з.}) & 0 \\ S_1 J_0(\mu R_{а.з.}) & S_2 I_0(\nu R_{а.з.}) & -S_3 z_2(a_2 R_{а.з.}) & -z_1(a_1 R_{а.з.}) \\ D_{б\,а.з.} J_0'(\mu R_{а.з.}) & D_{б\,а.з.} I_0'(\nu R_{а.з.}) & -D_{б\,отр.} z_2^1(a_2 R_{а.з.}) & 0 \\ S_1 D_{т\,а.з.} J_0'(\mu R_{а.з.}) & S_2 D_{т\,а.з.} I_0'(\nu R_{а.з.}) & -S_3 D_{т\,отр.} z_2^1(a_2 R_{а.з.}) & -D_{т\,отр.} z_1^1(a_1 R_{а.з.}) \end{vmatrix} = 0$$

Для определения $k_{эф}$ реактора с заданными размерами и свойствами в исходных двугрупповых уравнениях k_∞ заменяют на $k'_\infty = k_\infty / k_{эф}$ и решают задачу с k'_∞. Затем изменяют значения k'_∞ до тех пор, пока определитель не обратится в нуль. Найдя значение k'_∞, при котором определитель обратится в нуль, вычисляется $k_{эф} = k_\infty / k'_\infty$.

Двухгрупповой расчет выполняется для «холодного» реактора.

Прямой аналитический метод определения $k_{эф}$ методом двух групп является достаточно громоздким. Для решения этой задачи используется программа «reactor.exe».

Исходные данные:

Радиус активной зоны ($R_{а.з.}$)..... 153,75 см

Высота активной зоны ($H_{а.з.}$)..... 267,5 см

Толщина отражателя (Т) ..... 10 см

Эффективная добавка за счет отражателя (δ) ..... 6,698 см

Коэффициент диффузии в АЗ для быстрых нейтронов ($D^{б}_{а.з.}$)..... 1,134

Коэффициент диффузии в АЗ для тепловых нейтронов ($D^{т}_{а.з.}$) 0,455

Коэффициент диффузии в отражателе
для быстрых нейтронов ($D^{б}_{отр.}$)..... 0,8736

Коэффициент диффузии в отражателе
для тепловых нейтронов ($D^{т}_{отр.}$)..... 0,144

Вероятность избежать резонансного захвата (φ) 0,7581

Возраст нейтронов в АЗ ($\tau_{а.з.}$) .....55,403 см^2

Возраст нейтронов в отражателе ($\tau_{отр.}$).....27,3 см^2

Квадрат длины диффузии в АЗ ($L^2_{а.з.}$).....4,281 см^2

Квадрат длины диффузии в отражателе ($L^2_{отр.}$).....7,398 см^2

Радиус поглощающего стержня ($R_{ст}$) ..... 2 см

Выходные данные программы «reactor.exe» представлены в приложении I.

Предварительный расчет системы органов регулирования

Регулирование тепловых реакторов осуществляется в основном с помощью стержней, сильно поглощающих нейтроны, которые вводятся в реактор для компенсации избыточной реактивности. В процессе работы запас реактивности падает (отравление, шлакование, выгорание топлива) и поэтому необходимо освобождать скомпенсированный запас реактивности, выводя стержни из реактора.

Компенсирующая способность стержня характеризуется разностью [1]:

$$\Delta k = k_{эфф} - k_{эфф\ ст}, \qquad (1.10)$$

где $k_{эф.ст}$ – коэффициент размножения со стержнем.

Эффективность стержня зависит от размеров и формы стержня, поглощающей способности материалов стержня, места введения стержня в реакторе и от размеров и физических характеристик самого реактора.

Определим компенсирующую способность стержня, изначально рассчитав значения $k_{эфф}$, $k_{эфф\ ст}$:

$$k_{эфф} = \frac{k_\infty}{k'_\infty} = \frac{1,2516}{1,020987} = 1,22587,$$

$$k_{эфф\ ст} = \frac{k_\infty}{k'_{\infty\ ст}} = \frac{1,2516}{1,022556} = 1,22399,$$

$$\Delta k = k_{эфф} - k_{эфф\ ст} = 1,22587 - 1,22399 = 0,00188.$$

Число регулирующих стержней найдем следующим образом:

$$N_{\text{рег}} = \frac{\ln(k_{\text{эфф}})}{\Delta k\left[J_0^2(\mu R_{\text{а.з.}}) + J_1^2(\mu R_{\text{а.з.}})\right]}, \qquad (1.11)$$

где значение μ рассчитывается по формулам (1.4) и (1.6):

$$\chi_1^2 = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{L_{\text{а.з.}}^2} + \frac{1}{\tau_{\text{а.з.}}}\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{L_{\text{а.з.}}^2} + \frac{1}{\tau_{\text{а.з.}}}\right)^2 + \frac{k'_\infty - 1}{L_{\text{а.з.}}^2 \tau_{\text{а.з.}}}} = 0{,}015 \text{ см}^{-2},$$

$$\mu = \sqrt{\chi_1^2 - \left(\frac{\pi}{H_{\text{а.з.}}}\right)^2} = 0{,}009819 \text{ см}^{-1},$$

$$N_{\text{рег}} = \frac{\ln(k_{\text{эфф}})}{\Delta k\left[J_0^2(\mu R_{\text{а.з.}}) + J_1^2(\mu R_{\text{а.з.}})\right]} = 196.$$

Стержень, поставленный эксцентрично, имеет меньшую компенсирующую способность по сравнению с таким же стержнем в центре активной зоны. Из теории возмущений приближённо следует, что стержень, помещённый на расстоянии R_i от центра, имеет компенсирующую способность: $\Delta k_i = \Delta k \cdot J_0^2(\mu R_i)$.

В табл. 1 приведены результаты расчета компенсирующей способности стержней на R_i.

Таблица 1

i	R_i, см	N_i, штук	Δk_i
1	0	$1 \cdot 4$	0,00752
2	30,75	$4 \cdot 4$	0,029
3	61,5	$6 \cdot 4$	0,037
4	92,25	$6 \cdot 4$	0,029
5	123	$10 \cdot 4$	0,033

Общая компенсирующая способность системы стержней: $\sum_i \Delta k_i = \Delta k \cdot \sum_i J_0^2(\mu R_i)$. Следовательно $\sum_i \Delta k_i = 0{,}1352$.

$k_{\text{эфф}} - 1 - \sum_i \Delta k_i = 0{,}0905$, компенсируем борным регулированием.

Схема расположения стержней приведена в приложении I.

Расчет нуклидного состава топлива

В результате работы ядерного реактора протекают процессы, приводящие к изменению нуклидного состава реакторных материалов. Из-

менение нуклидного состава топлива связано с уменьшением делящегося материала, вследствие его выгорания, воспроизводством ядерного топлива, а также образованием отравляющих продуктов и шлаков.

Выгорание ядерного топлива

При изменении содержания делящихся изотопов основную роль играют U^{235} и Pu^{239}. Чтобы определить концентрации U^{235} и Pu^{239} необходимо значение глубины выгорания. Среднюю глубину выгорания приближенно оценим по формуле:

$$\overline{z} = 1{,}34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P \cdot t}{C_5}, \tag{1.12}$$

где $P = \dfrac{N}{m_{UO_2}}$ – удельная мощность, $\dfrac{\text{МВт}}{\text{т}}$;

t – время работы реактора, сутки.

Прежде чем определиться с m_{UO_2}, рассчитаем объем топлива в активной зоне:

$$V_{\text{топл}} = \pi \cdot R_{\text{тт}}^2 \cdot n_{\text{кассет}} \cdot n_{\text{твэл}} \cdot H_{\text{а.з.}}, \tag{1.13}$$

где $R_{\text{тт}}$ – радиус топливной таблетки (0,3765 см),

$n_{\text{кассет}}$ – число топливных кассет в активной зоне (379),

$n_{\text{твэл}}$ – число тепловыделяющих элементов (126),

$H_{\text{а.з.}}$ – высота активной зоны (267,5).

На основании перечисленных составляющих получим объем топлива:

$$V_{\text{топл}} = 3{,}14 \cdot 0{,}3765^2 \cdot 379 \cdot 126 \cdot 267{,}5 = 5{,}6858 \cdot 10^6 \text{ см}^3.$$

В конечном счете, масса топлива равна:

$$m_{UO_2} = \gamma_{UO_2} \cdot V_{\text{топл}} = 10{,}2 \cdot 5{,}6858 \cdot 10^6 = 57{,}995 \cdot 10^6 \text{ г} = 57{,}995 \text{ т},$$

следовательно, $P = \dfrac{N}{m_{UO_2}} = \dfrac{1500}{57{,}995} = 25{,}864 \dfrac{\text{МВт}}{\text{т}}$.

Для определения выгорания зададимся временем работы реактора: 272 суток.

$$\overline{z} = 1{,}34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P \cdot t}{C_5} = 1{,}34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{25{,}864 \cdot 272}{0{,}027} = 0{,}34914.$$

Ядерная концентрация U^{235} при выгорании меняется следующим образом:

$$N_5 = N_5^0 \cdot e^{-z} = 6{,}14 \cdot 10^{20} \cdot e^{-0{,}34914} = 4{,}331 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}.$$

Изменение концентрации Pu^{239} в процессе работы реактора:

$$\sigma_a^{9*} = \sigma_a^9 \cdot \left[1 - (1-\varphi)\nu_f^9 \cdot \frac{\sigma_f^9}{\sigma_a^9}\right] = 1186 \cdot \left[1 - (1-0,7486) \cdot 2,94 \cdot \frac{856,2}{1186}\right] = 553,386 \text{ барн}$$

$$N_9 = \frac{N_8^0 \cdot \sigma_a^8}{\sigma_a^{9*}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma_a^{9*}}{\sigma_a^5} \cdot z}\right) + \frac{\nu_f^5 \cdot \sigma_f^5 (1-\varphi) \cdot N_5^0}{\sigma_a^5 \cdot \left(\frac{\sigma_a^{9*}}{\sigma_a^5} - 1\right)} \cdot \left(e^{-z} - e^{-\frac{\sigma_a^{9*}}{\sigma_a^5} \cdot z}\right) = \frac{2,21 \cdot 10^{22} \cdot 1,603}{553,386} \cdot$$

$$\left(1 - e^{-\frac{553,386}{376,68} \cdot 0,34914}\right) + \frac{2,47 \cdot 320,98 \cdot (1-0,7486) \cdot 6,14 \cdot 10^{20}}{376,68 \cdot \left(\frac{553,386}{376,68} - 1\right)} \cdot \left(e^{-0,4685} - e^{-\frac{553,386}{376,68} \cdot 0,34914}\right) =$$

$= 9,948 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$.

Определим время работы реактора:

$$C_9 = \frac{N_9}{N_8^0} = \frac{9,948 \cdot 10^{19}}{2,21 \cdot 10^{22}} = 0,0045,$$

$$P_t = \frac{7,5 \cdot 10^5 \cdot C_5}{1 - 2 \cdot (1-\varphi)} \cdot \left(1 - e^{-z}\right) \cdot \left[1 - 0,3 \cdot (1-\varphi) \cdot \varepsilon\right] + \frac{2,42 \cdot 10^3}{1 - 2 \cdot (1-\varphi)} \cdot (z - 254 \cdot C_9) = 7,204 \cdot 10^3,$$

$$t = \frac{P_t}{P} = \frac{7,204 \cdot 10^3}{25,864} = 278,524 \text{ суток.}$$

После нахождения длительности компании реактора уточним среднюю глубину выгорания, а также концентрации U^{235} и Pu^{239}:

$$\overline{z} = 1,34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P \cdot t}{C_5} = 1,34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{25,864 \cdot 278,524}{0,027} = 0,357519,$$

$$N_5 = N_5^0 \cdot e^{-z} = 6,14 \cdot 10^{20} \cdot e^{-0,357519} = 4,294 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3},$$

$$N_9 = 1,009 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}.$$

Коэффициент воспроизводства

Для оценки относительной интенсивности образования вторичного вещества служит коэффициент воспроизводства (КВ), который определяется как отношение числа образовавшихся ядер плутония к числу исчезнувших ядер [1]:

$$\chi_{Pu} = \frac{\sigma_a^8 \cdot N_8}{\sigma_a^5 \cdot N_5} + \varepsilon \cdot \eta_5 \cdot (1-\varphi) = \frac{1,603 \cdot 2,21 \cdot 10^{22}}{376,68 \cdot 4,294 \cdot 10^{20}} + 1,031 \cdot 2,071 \cdot (1-0,7486) = 0,756.$$

Отравление реактора

Отравлением называется поглощение нейтронов короткоживущими радиоактивными ядрами. Важнейшим из отравляющих продуктов является Xe^{135}, имеющий очень большое сечение поглощения ($\sigma_{Xe} = 2,75 \cdot 10^6$ барн). После Xe^{135} наиболее сильным из вредных поглотителей нейтронов является изотоп Sm^{149}.

Самарий обладает большим сечением поглощения, достигающим значения $\sigma_{Sm} = 59200$ барн. Изотоп Sm^{149} является стабильным, поэтому поглощение нейтронов самарием следует называть шлаками. Однако вследствие значительной концентрации и высокого сечения поглощения Sm^{149} по степени и характеру воздействия на реактивность занимает особое положение среди шлаков и скорее приближается к отравляющим продуктам. Поэтому поглощение нейтронов самарием часто называют отравлением [3].

Определение средней плотности потока нейтронов по реактору

$$\Phi = \frac{3,1 \cdot 10^{13} \cdot N}{1,5 \cdot m_5}, \qquad (1.14)$$

где N – тепловая мощность реактора (1500 МВт), m_5 – масса U^{235} в граммах.

Определим массу U^{235}:

$$N_5 = C_5 \frac{m_{UO_2} \cdot Na}{M_{UO_2}} = 0,027 \cdot \frac{57,995 \cdot 10^6 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{270} = 3,493 \cdot 10^{27} \text{ молекул},$$

$$m_5 = \frac{N_5 \cdot M_5}{Na} = \frac{3,493 \cdot 10^{27} \cdot 235}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,36287 \cdot 10^6 \text{ г} = 1,36287 \text{ т}.$$

Определим среднюю плотность потока нейтронов по реактору:

$$\Phi = \frac{3,1 \cdot 10^{13} \cdot 1500 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 1,36287 \cdot 10^6} = 2,2746 \cdot 10^{13} \ \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

Определение равновесных ядерных концентраций ксенона и самария

$$N_{0I} = \frac{\omega_I}{\lambda_I} \cdot \Sigma_{f\,\text{топл}} \cdot \Phi = \frac{0,056}{2,87 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,197 \cdot 2,2746 \cdot 10^{13} = 8,743 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{0Xe} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \Sigma_{f\,топл} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,197 \cdot 2,2746 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 2,2746 \cdot 10^{13}} = 3,16 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{0Pm} = \frac{\omega_{Pm}}{\lambda_{Pm}} \cdot \Sigma_{f\,\text{топл}} \cdot \Phi = \frac{0,013}{3,85 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,197 \cdot 2,2746 \cdot 10^{13} = 1,513 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{0Sm} = \frac{\omega_{Pm}}{\sigma_{a\,Sm}} \cdot \Sigma_{f\,\text{топл}} = \frac{0,013}{5,92 \cdot 10^{-20}} \cdot 0,197 = 4,326 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Определение накопления I, Xe, Pm, Sm
при работе ядерного реактора на стационарной мощности

$$N_I(t) = N_{0I} \cdot (1 - e^{-\lambda_I \cdot t}),$$

$$N_{Xe}(t) = N_{0\,Xe} \cdot (1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) \cdot t}) - \frac{N_{0I}}{\frac{\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}}{\lambda_I} - 1} \cdot (e^{-\lambda_I \cdot t} - e^{-(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) \cdot t}),$$

$$N_{Pm}(t) = N_{0\,Pm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}),$$

$$N_{Sm}(t) = N_{0Sm} \cdot (1 - e^{-\Phi \cdot \sigma_{Sm} \cdot t}) - \frac{N_{0\,Pm}}{\frac{\Phi \sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} - 1} \cdot (e^{-\lambda_{Pm} \cdot t} - e^{-\Phi \cdot \sigma_{Sm} \cdot t}).$$

Определение потери реактивности при отравлении Xe и Sm
в любой момент времени до установления стационарного значения

$$\rho_{Xe} = \rho_{0\,Xe} \cdot \left(\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_{aXe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{aXe} \cdot \Phi - \lambda_I} \cdot \left(e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{aXe} \cdot \Phi) \cdot t} - e^{-\lambda_I \cdot t} \right) - \left(e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{aXe} \cdot \Phi) \cdot t} - 1 \right) \right),$$

$$\rho_{0\,Xe} = -\theta \cdot (\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \frac{\sigma_{Xe}}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi} \cdot \frac{\Sigma_{f\,\text{топл}}}{\Sigma_{a\,\text{топл}}} \cdot \Phi = -0,028,$$

$$\rho_{Sm} = \rho_{0Sm} \cdot \left[1 - \frac{\lambda_{Pm} e^{-\sigma_{Sm} \cdot \Phi \cdot t}}{(\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm} \cdot \Phi)} + \frac{\sigma_{Sm} \Phi \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}}{(\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm} \cdot \Phi)} \right],$$

$$\rho_{0Sm} = \frac{-\omega_{Pm} \cdot \theta \cdot \Sigma_{f\,\text{топл}}}{\Sigma_{a\,\text{топл}}} = -8,25 \cdot 10^{-3}.$$

Определим запас реактивности на начало компании для «горячего» реактора. Согласно определению запас реактивности – это максимально возможная реактивность при полностью извлеченных поглотителях:

$$\rho_{\text{зап}} = \frac{k_{\text{эфф}} - 1}{k_{\text{эфф}}} = 0,16.$$

Определим величину стационарного отравления ксеноном по формуле:

$$q_{Xe}^{\text{ст}} = (\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \frac{\sigma_{Xe}}{(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi)} \cdot \frac{\Sigma_{f\,\text{топл}}}{\Sigma_{a\,\text{топл}}} \cdot \Phi = 0,033.$$

Определение изменения плотности ядер I, Xe, Pm, Sm после остановки реактора

$$N_I(t) = N_{0I} \cdot e^{-\lambda_I \cdot t},$$

$$N_{Xe}(t) = N_{0Xe} \cdot e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} + \frac{N_{0I}}{1 - \frac{\lambda_{Xe}}{\lambda_I}} (e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} - e^{-\lambda_I \cdot t}),$$

$$N_{Pm}(t) = N_{0Pm} \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t},$$

$$N_{Sm}(t) = N_{0Sm} - N_{0Pm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}).$$

Определение изменения реактивности после остановки реактора

$$\rho_{Xe} = \rho_{0Xe} \cdot \left(\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} (e^{-\lambda_I \cdot t} - e^{-\lambda_{Xe} \cdot t}) + e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} \right),$$

$$\rho_{n.n.}(t) = \rho_{n.n.} \cdot [1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}],$$

$$\rho_{n.n.} = \rho_{0Sm} \cdot \frac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} \cdot \Phi = -2,666 \cdot 10^{-3}.$$

Определение времени достижения полной глубины йодной ямы и 90 % полного прометиевого провала

$$t(N_{Xe}) = -36,4 \cdot \ln\left(0,743 + \frac{0,59}{2,11 + \Phi \cdot \sigma_{aXe} \cdot 10^5} \right) = 7,484,$$

$$N_{Xe}^{макс} = 8,3 \cdot 10^2 \cdot \Phi \cdot \Sigma_{f\,\text{топл}} \cdot \left(1 + \frac{0,81}{2,11 + \Phi \cdot \sigma_{aXe} \cdot 10^5} \right)^{3,76} = 5,217 \cdot 10^{15}\ \text{см}^{-3},$$

$$t(N_{Sm}^{макс}) = \ln \frac{0.1}{\lambda_{Pm}} = 10,165\ \text{суток}.$$

Определение реактивности при переходе с одного уровня мощности на другой

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{0Xe} \left[\frac{\lambda_{Xe1}^*}{\lambda_{Xe2}^*} \cdot \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \left(1 - e^{-\lambda_{Xe2}^* \cdot t} \right) + \frac{\lambda_{Xe1}^*}{\lambda_{Xe2}^* - \lambda_I} \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 1 \right) \cdot \left(e^{-\lambda_{Xe2}^* \cdot t} - e^{-\lambda_I \cdot t} \right) + e^{-\lambda_{Xe2}^* \cdot t} \right],$$

$$\lambda_{Xe}^* = \lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi.$$

В приложении I представлены зависимости отравления реактора *Xe*, *I*, *Sm*, *Pm*, а также изменения реактивности, в том числе и при переходе с одного уровня мощности на другой.

Шлакование реактора

К шлакам относятся все стабильные, а также долгоживущие радиоактивные продукты деления. Поглощающая способность шлаков после выключения реактора практически не изменяется и потеря реактивности не восстанавливается.

В связи с определяющим влиянием сечения поглощения на кинетику шлакования было предложено все шлаки разделить на три группы в зависимости от величины сечения поглощения (Для определения потерь на шлаках необходимо знать величину выгорания z, которая составляет 0.357519) [1]:

1. К первой группе шлаков относятся сильно поглощающие шлаки, для которых $\sigma_{ai} >> \sigma_{a5} \approx 700$ бн (Sm^{149}, Gd^{157}, Eu^{155}, Cd^{113} и др.). Относительное поглощение в шлаках первой группы равно: $q'_{\text{шл1}} = 15{,}1 \cdot 10^{-3}$
2. Ко второй группе относятся шлаки, для которых $\sigma_{ai} \approx \sigma_{a5}$ (Kr^{83}, Xe^{131}, Nd^{143}, Sm^{152}, Eu^{153} и др.): $q'_{\text{шл2}} = 15{,}6 \cdot 10^{-3}$ при z = 0,357519.
3. К третьей группе относятся все остальные шлаки со слабым поглощением $\sigma_{ai} < \sigma_{a5}$ (Kr^{82}, Mo^{95}, Ag^{100}, I^{127}, I^{129}, Cs^{132} и др.): $q'_{\text{шл3}} = 11{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot z = 4{,}076 \cdot 10^{-3}$.

Суммарное поглощение тепловых нейтронов шлаками всех групп:

$$q_{\text{шл}} = q'_{\text{шл1}} + q'_{\text{шл2}} + q'_{\text{шл3}} = (15{,}1 + 15{,}6 + 4{,}076) \cdot 10^{-3} = 0{,}035.$$

Расчет реактора в конце кампании

В результате изменений, которые происходят в изотопическом составе активной зоны в процессе работы реактора, меняется коэффициент размножения для бесконечной среды k_∞, квадрат диффузионной длины L^2 и, следовательно, эффективный коэффициент размножения $k_{\text{эфф}}$. Будем считать, что φ и ε изменяются незначительно.

В силу того, что температурный коэффициент отрицательный, то расчеты проводятся для «горячего» реактора.

Коэффициент размножения на тепловых нейтронах в конце кампании:

$$\eta^{к.к.} = \frac{\nu_f^5 \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5^{к.к.} + \nu_f^9 \cdot \sigma_f^9 \cdot N_9^{к.к.}}{\sigma_a^5 \cdot N_5^{к.к.} + \sigma_a^8 \cdot N_8^{к.к.} + \sigma_a^9 \cdot N_9^{к.к.}} =$$

$$= \frac{2{,}47 \cdot 320{,}98 \cdot 4{,}294 \cdot 10^{20} + 2{,}94 \cdot 856{,}2 \cdot 1{,}009 \cdot 10^{20}}{376{,}69 \cdot 4{,}294 \cdot 10^{20} + 1{,}603 \cdot 2{,}21 \cdot 10^{22} + 1186 \cdot 1{,}009 \cdot 10^{20}} = 1{,}876.$$

Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов в конце кампании ведется по прежней методике, изложенной в I части курсового проекта, но предварительно вычисляются новые сечения с учетом изменившегося изотопного состава

$$\sum_{a\,\text{шл}} = q_{\text{шл}} \cdot \sum_{a5} = 0,035 \cdot 0,231 = 8,033 \cdot 10^{-3}\ \text{см}^{-1},$$

$$\sum_{a\,Xe} = q_{Xe}^{\text{ст}} \cdot \sum_{a\,\text{топл}} = 0,033 \cdot 0,266 = 8,865 \cdot 10^{-3}\ \text{см}^{-1}.$$

Макроскопическое сечение поглощения в топливе:

$$\sum_a^{\text{топл}} = (\sigma_a^5 \cdot N_5^{к.к.} + \sigma_a^8 \cdot N_8^{к.к.} + \sigma_a^9 \cdot N_9^{к.к.}) \cdot 10^{-24} + \sum_{a\,\text{шл}} + \sum_{a\,Xe} = 0,334\ \text{см}^{-1}.$$

Макроскопическое сечение поглощения фиктивного блока:

$$\sum_{a\,\text{ф}} = \frac{1}{S_{\text{ф}}} \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{a\,i} \cdot S_i = \frac{\sum_a^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \sum_{a\,\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{ф}}} = 0,282\ \text{см}^{-1}.$$

Аналогично проведем расчеты для транспортного макроскопического сечения:

$$\sum_{tr\,\text{шл}} = q_{\text{шл}} \cdot \sum_{tr5} = 0,035 \cdot 0,24 = 8,346 \cdot 10^{-3}\ \text{см}^{-1},$$

$$\sum_{tr\,Xe} = q_{Xe}^{\text{ст}} \cdot \sum_{tr\,\text{топл}} = 0,033 \cdot 0,639 = 0,021\ \text{см}^{-1},$$

$$\sum_{tr}^{\text{топл}} = (\sigma_{tr}^5 \cdot N_5^{к.к.} + \sigma_{tr}^8 \cdot N_8^{к.к.} + \sigma_{tr}^9 \cdot N_9^{к.к.}) \cdot 10^{-24} + \sum_{tr\,\text{шл}} + \sum_{tr\,Xe} = 0,553\ \text{см}^{-1},$$

$$\sum_{tr\,\text{ф}} = \frac{1}{S_{\text{ф}}} \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{tr\,i} \cdot S_i = \frac{\sum_{tr}^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \sum_{tr\,\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_{\text{ф}}} = 0,6901\ \text{см}^{-1}.$$

Подставляя полученные значения, а также значения из I части курсового проекта, получим:

$$L_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_{a\,\text{ф}} \cdot \sum_{tr\,\text{ф}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,282 \cdot 0,6901}} = 1,308\ \text{см},$$

$$F = 1 + \frac{\left(\frac{R_{\text{ф}}}{L_{\text{ф}}}\right)^2}{8} - \frac{\left(\frac{R_{\text{ф}}}{L_{\text{ф}}}\right)^4}{192} = 1,013,$$

$$\theta'_{\text{ф}} = \frac{1}{1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \sum_{\text{а зам}}}{S_{\text{ф}} \cdot \sum_{\text{а ф}}} + (E - 1)} = 0,892,$$

$$\theta_0 = \frac{\sum_a^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}}}{\sum_{a\,\text{ф}} \cdot S_{\text{ф}}} = 0,841,$$

$$\theta^{к.к.} = \theta'_{\text{ф}} \cdot \theta_0 = 0,892 \cdot 0,841 = 0,7502.$$

Коэффициент размножения для бесконечной среды в конце кампании:

$$k_\infty^{к.к.} = \eta^{к.к.} \cdot \theta^{к.к.} \cdot \varepsilon^{к.к.} \cdot \varphi^{к.к.} = 1,876 \cdot 0,7502 \cdot 0,7486 \cdot 1,031 = 1,088.$$

Эффективный коэффициент размножения в конце компании (квадрат длины диффузии рассчитывается по прежней методике, изложенной в I части, с учетом процессов способствующих изменению изотопного состава топлива):

$$k_{\text{эфф}}^{к.к.} = \frac{k_{\infty}^{к.к.} \cdot \exp\left[-B^2 \cdot \tau_{к.к.}\right]}{1 + B^2 \cdot L_{к.к.}^2} = \frac{1,069 \cdot \exp\left[-0,00035 \cdot 82,55\right]}{1 + 0,00035 \cdot 2,597} = 1,056.$$

2. Теплогидравлический расчет

Максимальные значения величин

Предполагая, что максимумы энерговыделения по высоте и радиусу активной зоны реактора совпадают и соответствуют положению – центр АЗ (z = 0, r = 0), то максимальное значение объемной плотности тепловыделения в топливе определяется соотношением [1]:

$$q_v^{\max} = q_v(z = 0, r = 0) = \frac{N \cdot k_v}{n_{\text{кассет}} \cdot n_{\text{твэл}} \cdot \pi \cdot R_{\text{ТТ}}^2 \cdot H_{\text{а.з.}}}, \qquad (2.1)$$

где z и r – осевая и радиальная координаты, соответственно,

N – тепловая мощность реактора,

$n_{\text{кассет}}$ – число топливных кассет,

$n_{\text{твэл}}$ – число тепловыделяющих элементов в кассете,

$R_{\text{ТТ}}$ – радиус топливной таблетки,

$H_{\text{а.з.}}$ – высота активной зоны,

k_v – коэффициент неравномерности энерговыделения по объему АЗ.

Последний определяется произведением коэффициентов неравномерности по высоте k_z и по радиусу k_r:

$$k_v = k_z \cdot k_r, \qquad (2.2)$$

$$k_z = 1,57 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot \delta_{\text{эф}}}{H_{\text{а.з.}} + 2 \cdot \delta_{\text{эф}}}\right]^{-1}, \qquad (2.3)$$

$$k_r = 2,32 \cdot \left[1 + \frac{\delta_{\text{эф}}}{R_{\text{а.з.}} + 2 \cdot \delta_{\text{эф}}}\right]^{-1}, \qquad (2.4)$$

где $R_{\text{а.з.}}$ – радиус активной зоны,

$\delta_{\text{эф}}$ – эффективная добавка.

Значение $\delta_{\text{эф}}$ в первом приближении можно положить равным значению длины миграции в материале отражателя: $\delta_{\text{эф}} \approx M_{H_2O} = 5,89$ см .

Подставляя значения в формулы (2.2)–(2.4) найдем коэффициент неравномерности по объему активной зоны:

$$k_v = 1,57 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot 5,89}{267,5 + 2 \cdot 5,89}\right]^{-1} \cdot 2,32 \cdot \left[1 + \frac{5,89}{153,75 + 2 \cdot 5,89}\right]^{-1} = 1,506 \cdot 2,240 = 3,375.$$

Подставляя значения в формулу (2.1) определим максимальное значение объемной плотности тепловыделения в топливе:

$$q_v^{\max} = \frac{1500 \cdot 10^6 \cdot 3,375}{379 \cdot 126 \cdot 3,14 \cdot 0,3765^2 \cdot 267,5} = 890,345 \ \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}.$$

Определим максимальное значение линейной плотности тепловыделения, а также значение поверхностного теплового потока:

$$q_l^{\max} = q_v^{\max} \cdot \pi \cdot R_{\text{ТТ}}^2 = 890,345 \cdot 3,14 \cdot 0,3765^2 = 396,495 \ \frac{\text{Вт}}{\text{см}},$$

$$q_s^{\max} = \frac{q_v^{\max} \cdot R_{\text{ТТ}}}{2} = \frac{890,345 \cdot 0,3765}{2} = 167,607 \ \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Расчет значений q_v, q_l и q_s по высоте наиболее энергонапряженной (центральной) кассеты

Для расчета кассету разобьем на 10 равных участков ($I = 10$). Теплоноситель в нашем случае подводится снизу, поэтому координаты, соответствующие середине участков, определяются соотношением:

$$z_i = -\frac{H_{\text{а.з.}}}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot i - 1}{I}\right), \tag{2.5}$$

где i – индекс, соответствующий участку.

Значения потоков q_v, q_l и q_s определим по формулам:

$$q_{v_i} = q_v^{\max} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{\text{АЗ}}}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}, \tag{2.6}$$

$$q_{l_i} = q_l^{\max} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{\text{АЗ}}}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{см}}, \tag{2.7}$$

$$q_{s_i} = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{\text{АЗ}}}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}. \tag{2.8}$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Полученные данные в виде гистограмм приведены в приложении II.

Таблица 2

i	z_i, м	q_{v_i}, Вт/м^3	q_{l_i}, Вт/м	q_{s_i}, Вт/м^2
1	–1,2038	$1,3991\cdot10^8$	$0,6231\cdot10^4$	$0,2634\cdot10^6$
2	–0,9363	$4,0465\cdot10^8$	$1,8020\cdot10^4$	$0,7618\cdot10^6$
3	–0,6688	$6,2982\cdot10^8$	$2,8048\cdot10^4$	$1,1856\cdot10^6$
4	–0,4013	$7,9340\cdot10^8$	$3,5332\cdot10^4$	$1,4936\cdot10^6$
5	–0,1338	$8,7939\cdot10^8$	$3,9162\cdot10^4$	$1,6555\cdot10^6$
6	0,1338	$8,7939\cdot10^8$	$3,9162\cdot10^4$	$1,6555\cdot10^6$
7	0,4013	$7,9340\cdot10^8$	$3,5332\cdot10^4$	$1,4936\cdot10^6$
8	0,6688	$6,2982\cdot10^8$	$2,8048\cdot10^4$	$1,1856\cdot10^6$
9	0,9363	$4,0465\cdot10^8$	$1,8020\cdot10^4$	$0,7618\cdot10^6$
10	1,2038	$1,3991\cdot10^8$	$0,6231\cdot10^4$	$0,2634\cdot10^6$

Расчет температурного состояния теплоносителя по длине кассеты

Количество тепла, выделяющееся на отдельных участках и в центральной кассете

Количество тепла, выделяемое на $i-$м участке, определяется соотношением:

$$Q_i = q_{li}\cdot\Delta z\cdot n_{\text{твэл}}, \tag{2.9}$$

где Δz – длина любого участка, $\Delta z = \Delta z_i = const = \dfrac{H_{\text{а.з.}}}{I} = \dfrac{267,5}{10} = 26,75$ см.

$$Q_1 = Q_{10} = 0,2100\cdot10^6 \text{ Вт},$$

$$Q_2 = Q_9 = 0,6074\cdot10^6 \text{ Вт},$$

$$Q_3 = Q_8 = 0,9453\cdot10^6 \text{ Вт},$$

$$Q_4 = Q_7 = 1,1910\cdot10^6 \text{ Вт},$$

$$Q_5 = Q_6 = 1,3200\cdot10^6 \text{ Вт}.$$

Множитель $n_{\text{твэл}}$ в соотношении (2.9) учитывает то, что значение q_l на участках кассеты определялось в расчете на один твэл. Суммарное тепловыделение в центральной кассете в дискретном представлении:

$$Q_\Sigma = \sum_{i=1}^{I} Q_i = 8,547\cdot10^6 \text{ Вт}.$$

Суммарное тепловыделение в центральной кассете в интегральном представлении:

$$Q_{\Sigma}^{*} = \frac{2}{\pi} \cdot q_l^{\max} \cdot H_{\text{а.з.}} \cdot n_{\text{твэл}} = \frac{2}{3{,}14} \cdot 396{,}495 \cdot 267{,}5 \cdot 126 = 8{,}512 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Для определения погрешности проведенных ранее расчетов необходимо сравнить величину Q_{Σ} с Q_{Σ}^{*}. Таким образом, погрешность вычислений:

$$\delta = \left| \frac{Q_{\Sigma} - Q_{\Sigma}^{*}}{Q_{\Sigma}^{*}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{8{,}547 \cdot 10^6 - 8{,}512 \cdot 10^6}{8{,}512 \cdot 10^6} \right| \cdot 100 = 0{,}412 \text{ %}.$$

Определение расхода теплоносителя через центральную кассету

Если полагать, что величина теплоемкости мало изменяется по кассете, то подогрев теплоносителя в кассете может быть определен следующим образом:

$$\Delta t = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} = \frac{Q_{\Sigma}}{G \cdot C_p}, \qquad (2.10)$$

где C_p – удельное значение теплоемкости теплоносителя при температуре $\overline{t} = 0{,}5 \cdot (t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$ и давлении в первом контуре реактора (15 МПа), $C_p = 4950 \, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Подогрев теплоносителя в активной зоне: $\Delta t = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} = 280 - 260 = 20 \ ^{\circ}C$.

Таким образом, зная подогрев теплоносителя, расход определяется соотношением:

$$G = \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta t \cdot C_p} = \frac{8{,}547 \cdot 10^6}{20 \cdot 4950} = 86{,}334 \, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Изменение температуры и скорости теплоносителя при движении в кассете

Подогрев теплоносителя на каждом участке кассеты определяется по соотношению:

$$\Delta t_i = \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \qquad (2.11)$$

где C_{pi} – удельная теплоемкость теплоносителя при температуре на *i*-м участке. Последняя величина еще не определена, поэтому используется следующая процедура расчета.

Температура теплоносителя на *i*-м участке:

$$\overline{t}_i = t_{i-1} + \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \qquad (2.12)$$

где C_{pi} в первом приближении задается равной C_{pi-1}. Затем значение C_{pi} уточняется по соотношениям:

$$C_{pi} = f(\overline{t}_i), \;\; \overline{t}_i = \frac{(t_i + t_{i-1})}{2}, \qquad (2.13)$$

где функция $C_p = f(t)$ табулирована [2]. После этого вычисление по (2.12) повторяется и определяется значение t_i с использованием уточненного значения C_{pi}.

На основе данной процедуры расчета были получены значения, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

i	1	2	3	4	5
$C_{pi}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	4823,276	4836,042	4860,183	4893,203	4931,709
$t_i, {}^{\circ}C$	260,504	261,959	264,212	267,031	270,131
i	6	7	8	9	10
$C_{pi}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	4971,853	5009,709	5041,676	5067	5080
$t_i, {}^{\circ}C$	273,206	275,960	278,131	279,520	279,999

Гистограмма изменения температуры теплоносителя по кассете представлена в приложении II.

Изменение температурного состояния теплоносителя по длине кассеты приводит к изменению плотности и, следовательно, скорости движения теплоносителя:

$$\upsilon_i = \frac{G}{F_i \cdot \gamma_i}, \qquad (2.14)$$

где F_i – площадь проходного сечения кассеты,

γ_i – плотность теплоносителя на $i-$м участке.

Функция $\gamma = f(t)$ табулирована, а температура теплоносителя на всех участках определена [2].

Площадь проходного сечения кассеты определяется как разность между площадью поперечного сечения кассеты и площадью поперечного сечения конструкционных элементов, размещенных в нем.

Предположим, что на 6 участке размещена дистанцирующая решетка, то площадь проходного сечения составит:

$$F_6 = S_{\text{яч}} - \pi \cdot n_{\text{твэл}} \cdot R^2_{\text{твэл внеш}} - S_{\text{ДР}} = 95{,}904 \text{ см}^2 = 0{,}00959 \text{ м}^2.$$

На остальных участках, где дистанцирующая решетка отсутствует, площадь проходного сечения равна:

$$F = S_{\text{яч}} - \pi \cdot n_{\text{твэл}} \cdot R^2_{\text{твэл внеш}} = 0{,}01176 \text{ м}^2.$$

Результаты изменений плотности и скорости движения теплоносителя представлены в табл. 4.

Таблица 4

i	1	2	3	4	5
$\gamma_i, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	795,194	792,866	789,261	784,750	779,790
$\upsilon_i, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	9,235	9,262	9,305	9,358	9,418
i	6	7	8	9	10
$\gamma_i, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	774,870	770,464	766,990	764,768	764,002
$\upsilon_i, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	11,618	9,532	9,575	9,603	9,612

Гистограмма изменения скорости теплоносителя по кассете представлена в приложении II.

Расчет коэффициентов теплоотдачи с поверхности твэл

Для расчета локальных значений коэффициентов теплоотдачи используется следующее соотношение:

$$\alpha_i^0 = \frac{\lambda_i}{d_{эi}} \cdot Nu_i, \tag{2.15}$$

$$d_{эi} = \frac{4 \cdot F_i}{П_i}, \tag{2.16}$$

где Nu_i – критерий Нуссельта,

λ_i – коэффициент теплопроводности теплоносителя на $i-$м участке,

$d_{эi}$ – эквивалентный диаметр теплоносителя на $i-$м участке.

$П_i$ – периметр кассеты, омываемый на $i-$м участке теплоносителем.

Периметр кассеты на 6 участке составляет:

$$П_6 = 6,6814 \text{ м.}$$

Периметр кассеты на остальных участках равен:

$$П = 3,9742 \text{ м.}$$

Следовательно: $$d_{э6} = \frac{4 \cdot 0,00959}{6,6814} = 0,00574 \text{ м.}$$

На остальных участках, где дистанцирующая решетка отсутствует, эквивалентный диаметр теплоносителя равен:

$$d_э = \frac{4 \cdot 0,01176}{3,9742} = 0,01183 \text{ м.}$$

Локальные значения критериев подобия,
расчет критерия Нуссельта на участках кассеты

Критерий Нуссельта определяется соотношением:

$$Nu_i = 0,073 \cdot (d_{эi})^{0.6} \cdot \mathrm{Re}_i^{0.6} \cdot \mathrm{Pr}_i^{0.3}, \qquad (2.17)$$

где Re_i и Pr_i – критерии Рейнольдса и Прандтля соответственно.

Значения Re_i и Pr_i определяются соотношениями:

$$\mathrm{Re}_i = \frac{\upsilon_i \cdot d_{эi} \cdot \gamma_i}{\mu_i} = \frac{\upsilon_i \cdot d_{эi}}{\nu_i},$$

$$\mathrm{Pr}_i = \frac{\nu_i}{a_i}, \qquad (2.18)$$

где μ_i – динамическая вязкость,

ν_i – кинематическая вязкость,

a_i – коэффициент температуропроводности теплоносителя.

По определению $a_i = \frac{\lambda_i}{C_{pi} \cdot \gamma_i}$.

Результаты вычислений представлены в табл. 5.

Коэффициент теплоотдачи на *i*-м участке определяется как произведение:

$$\alpha_i = \alpha_i^0 \cdot \varepsilon_{zi} \cdot \varepsilon_{qi}, \qquad (2.19)$$

где ε_{zi} – коэффициент, учитывающий влияние гидравлической стабилизации:

$$\varepsilon_{zi} = \begin{cases} 1{,}57 & \text{при} \quad \dfrac{z_c}{d_{эi}} \le 0{,}05, \\ 0{,}86 + 0{,}54 \cdot \left(\dfrac{d_{эi}}{z_c} \right)^{0.4} & \text{при} \quad 0{,}5 \le \dfrac{z_c}{d_{эi}} \le 30, \\ 1 & \text{при} \quad \dfrac{z_c}{d_{эi}} > 30. \end{cases} \tag{2.20}$$

где $z_c = z_i' - z_{\text{м.с.}}$ – расстояние от данного участка до ближайшего местного сопротивления, расположенного выше по течению (вход в кассету, дистанцирующая решетка).

ε_{qi} – поправка на тепловую стабилизацию, которая вычисляется по соотношению:

$$\varepsilon_{qi} = \frac{q_{si}}{\tilde{q}_i}, \tag{2.21}$$

$$\tilde{q}_i = q_s^{\max} \cdot \frac{\cos\left(\pi \cdot \dfrac{z_i}{H_{\text{а.з.}}} \right)}{\left(\dfrac{3 \cdot d_э}{\Delta z^*} + 1 \right)}, \tag{2.22}$$

где Δz^* – расстояние от местного сопротивления до середины данного участка кассеты.

Таблица 5

i	$\lambda_i, \dfrac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\nu_i, \dfrac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$a_i, \dfrac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Re_i	Pr_i	Nu_i
1	0,6214	$0{,}1255 \cdot 10^{-6}$	$16{,}201 \cdot 10^{-8}$	$8{,}708 \cdot 10^5$	0,7746	274,058
2	0,6195	$0{,}1252 \cdot 10^{-6}$	$16{,}157 \cdot 10^{-8}$	$8{,}754 \cdot 10^5$	0,7749	274,956
3	0,6166	$0{,}1247 \cdot 10^{-6}$	$16{,}075 \cdot 10^{-8}$	$8{,}826 \cdot 10^5$	0,7760	276,430
4	0,6130	$0{,}1242 \cdot 10^{-6}$	$15{,}965 \cdot 10^{-8}$	$8{,}918 \cdot 10^5$	0,7777	278,342
5	0,6091	$0{,}1235 \cdot 10^{-6}$	$15{,}828 \cdot 10^{-8}$	$9{,}021 \cdot 10^5$	0,7799	280,508
6	0,6052	$0{,}1229 \cdot 10^{-6}$	$15{,}708 \cdot 10^{-8}$	$5{,}428 \cdot 10^5$	0,7823	134,137
7	0,6017	$0{,}1223 \cdot 10^{-6}$	$15{,}588 \cdot 10^{-8}$	$9{,}222 \cdot 10^5$	0,7846	284,746
8	0,5989	$0{,}1218 \cdot 10^{-6}$	$15{,}487 \cdot 10^{-8}$	$9{,}299 \cdot 10^5$	0,7866	286,400
9	0,5971	$0{,}1215 \cdot 10^{-6}$	$15{,}409 \cdot 10^{-8}$	$9{,}349 \cdot 10^5$	0,7887	287,548
10	0,5965	$0{,}1214 \cdot 10^{-6}$	$15{,}369 \cdot 10^{-8}$	$9{,}367 \cdot 10^5$	0,7901	288,018

Результаты вычислений представлены в табл. 6.

Таблица 6

i	$\alpha_i^0, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\varepsilon_{zi}1$	$\varepsilon_{zi}2$	$\varepsilon_{qi}1$	$\varepsilon_{qi}2$	$\alpha_i, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1	$1{,}439 \cdot 10^4$	1,065	1	1,265	1	$1{,}939 \cdot 10^4$
2	$1{,}440 \cdot 10^4$	1	1	1,088	1	$1{,}567 \cdot 10^4$
3	$1{,}441 \cdot 10^4$	1	1	1,053	1	$1{,}517 \cdot 10^4$
4	$1{,}442 \cdot 10^4$	1	1	1,038	1	$1{,}497 \cdot 10^4$
5	$1{,}444 \cdot 10^4$	1	1	1,029	1	$1{,}486 \cdot 10^4$
6	$1{,}414 \cdot 10^4$	1	1,065	1,012	1,129	$1{,}636 \cdot 10^4$
7	$1{,}448 \cdot 10^4$	1	1	1,02	1,088	$1{,}608 \cdot 10^4$
8	$1{,}450 \cdot 10^4$	1	1	1,018	1,053	$1{,}554 \cdot 10^4$
9	$1{,}451 \cdot 10^4$	1	1	1,016	1,038	$1{,}530 \cdot 10^4$
10	$1{,}452 \cdot 10^4$	1	1	1,014	1,029	$1{,}516 \cdot 10^4$

Гистограмма изменения коэффициента теплоотдачи по кассете представлена в приложении II.

Расчет коэффициентов теплоотдачи с поверхности твэл

Температура поверхности твэл на участках

Температура поверхности твэл на *i*-м участке определяется соотношением:

$$t_{\text{пов}\,i} = t_i + \frac{q_{si}}{\alpha_i}. \qquad (2.23)$$

Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7

i	1	2	3	4	5
$t_{\text{пов}\,i}, {}^\circ C$	274,088	310,574	342,367	366,818	381,498
i	6	7	8	9	10
$t_{\text{пов}\,i}, {}^\circ C$	374,395	368,837	354,451	329,321	297,376

Гистограмма изменения температуры на поверхности твэл по кассете представлена в приложении II.

Температура на поверхности топливной таблетки (ТТ)

Температура на поверхности ТТ определяется соотношением:

$$t_{\text{ТТ}\,i} = t_{\text{пов}\,i} + \Delta t_i, \qquad (2.24)$$

где Δt_i – перепад температуры на оболочке твэл.

Для цилиндрического твэл:

$$\Delta t_i = \frac{q_{si}}{\lambda_{\text{об}}(t_{\text{пов}\,i})} \cdot R_{\text{твэл внеш}} \cdot \ln \frac{R_{\text{твэл внеш}}}{R_{\text{твэл внутр}}}, \qquad (2.25)$$

где $R_{\text{твэл внутр}}$ – внутренний радиус оболочки твэл,

$\lambda_{\text{об}}(t_{\text{пов}\,i})$ – коэффициент теплопроводности материала оболочки при температуре $t_{\text{пов}i}$.

Результаты расчета представлены в табл. 8.

Таблица 8

i	1	2	3	4	5
$\lambda_{\text{об}}(t_{\text{пов}\,i}), \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	58,968	56,232	54,078	52,611	51,730
$\Delta t_i, {}^{\circ}C$	1,872	5,678	9,189	11,899	13,413
$t_{\text{ТТ}\,i}, {}^{\circ}C$	275,96	316,25	351,56	378,72	394,91
i	6	7	8	9	10
$\lambda_{\text{об}}(t_{\text{пов}\,i}), \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	52,156	52,489	53,353	54,861	57,222
$\Delta t_i, {}^{\circ}C$	13,303	11,926	9,314	5,820	1,929
$t_{\text{ТТ}\,i}, {}^{\circ}C$	387,69	380,76	363,76	335,14	299,31

Гистограмма изменения температуры на поверхности ТТ по кассете представлена в приложении II.

Распределение температуры в ТТ

Для цилиндрической топливной таблетки, расположенной в твэле на i-м участке, распределение температуры по радиусу описывается соотношением:

$$t_i(r) = t_{\text{ТТ}\,i} + \frac{q_{vi}}{4 \cdot \lambda_{\text{топ}}(t_{\text{ТТ}\,i})} \cdot (R_{\text{ТТ}}^2 - r^2), \qquad (2.26)$$

где $\lambda_{\text{топ}}(t_{\text{ТТ}\,i})$ – коэффициент теплопроводности топлива при температуре $t_{\text{ТТ}\,i}$,

r – текущее значение координаты $0 \le r \le R_{\text{ТТ}}$.

Распределение температуры в ТТ по радиусу, расположенной в центре АЗ определяется следующим образом:

$$t_{ц}^{\max} = t_{\text{ТТ}}^{\max} + \frac{q_v^{\max}}{4 \cdot \lambda_{\text{топ}}(t_{\text{ТТ}}^{\max})} \cdot (R_{\text{ТТ}}^2 - r^2). \qquad (2.27)$$

Результаты распределения температуры по радиусу на различных участках кассеты представлены в табл. 9.

Таблица 9

i	$\lambda_{\text{топ}}(t_{\text{ТТ}\,i}),\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$t_i(r),\ ^{\circ}C$					
		0, м	0,00081, м	0,00162, м	0,00243, м	0,00324, м	0,00405, м
1	6,0424	370,910	367,112	355,718	336,728	310,142	275,959
2	5,6931	607,711	596,053	561,078	502,786	421,177	316,252
3	5,4834	822,555	803,715	747,195	652,996	521,116	351,556
4	5,3543	986,343	962,038	889,123	767,598	597,463	378,717
5	5,2774	1078,21	1050,88	968,884	832,224	640,899	394,911
6	5,3117	1066,59	1039,44	957,969	822,190	632,100	387,699
7	5,3446	989,494	965,145	892,097	770,351	599,907	380,764
8	5,4254	839,798	820,757	763,633	668,426	535,137	363,765
9	5,5613	633,508	621,573	585,769	526,096	442,553	335,141
10	5,8400	397,545	393,616	381,827	362,179	334,672	299,306

Гистограмма распределения температуры в центре ТТ по кассете, а также графическое представление изменения температуры в ТТ по радиусу на наиболее энергонапряженном участке приведены в приложении II.

Распределение температуры в органах регулирования

Обычно в качестве материалов для изготовления органов регулирования реактором используется борсодержащие материалы: карбид бора, бористая сталь. Тепловыделение в таких материалах в основном (60 % от общего тепловыделения) обусловлено протеканием реакции

$$ {}_0n^1 + B^{10} = {}_3Li^7 + {}_2He^4 + \gamma, \qquad (2.28) $$

которая происходит на тепловых и промежуточных (в меньшей степени) нейтронах.

2.6.1. Объемная плотность тепловыделения в поглощающем стержне

Среднее по АЗ значение плотности потока тепловых нейтронов определяется соотношением:

$$ \bar{\Phi} = \frac{\bar{N}}{\Sigma_f \cdot E_f \cdot V_{\text{топ}}}, \qquad (2.29) $$

где $E_f \cong 181\,\text{МэВ} = 2{,}9 \cdot 10^{-11}\,\text{Вт}\cdot\text{с}$ – энергия деления одного ядра, которая превращается в тепловую.

Объем топлива в АЗ:

$$V_{\text{топл}} = \pi \cdot R_{\text{тт}}^2 \cdot n_{\text{кассет}} \cdot n_{\text{твэл}} \cdot H_{\text{а.з.}} = 3{,}14 \cdot 0{,}405^2 \cdot 379 \cdot 126 \cdot 267{,}5 = 6{,}579 \cdot 10^6 \text{ см}^3.$$

Тогда среднее по АЗ значение плотности тепловых нейтронов составит:

$$\bar{\Phi} = \frac{\bar{N}}{\Sigma_f \cdot E_f \cdot V_{\text{топ}}} = \frac{1500 \cdot 10^6}{0{,}197 \cdot 2{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 6{,}579 \cdot 10^6} = 3{,}991 \cdot 10^{13} \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по объему АЗ в идеальном случае описывается выражением:

$$\Phi(r,z) = \bar{\Phi} \cdot k_v \cdot J_0\left(2{,}405 \cdot \frac{r}{R_{\text{а.з.}}}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z}{H_{\text{а.з.}}}\right), \qquad (2.30)$$

где $0 \le r \le R_{\text{а.з.}}$, $-\frac{H_{\text{а.з.}}}{2} \le z \le \frac{H_{\text{а.з.}}}{2}$.

Объемная плотность энерговыделения в материале стержня определяется соотношением:

$$q_{V\text{ст}}(z) = \Delta E \cdot \Phi(R^*, z) \cdot \sum_{n,\alpha} \cdot 0{,}33, \qquad (2.31)$$

где R^* – расстояние от оси АЗ до оси стержня,

z – координата того участка стержня, для которого определяется температурный режим эксплуатации,

$\sum_{n,\alpha}$ – макроскопическое сечение реакции (n,α),

$\Delta E \cong 2{,}31 \text{ МэВ} = 3{,}696 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{с}$.

Максимально жесткие температурные режимы соответствуют участкам стержней, находящимся в области максимума плотности потока тепловых нейтронов. В идеальном случае максимум Φ приходится на координату z = 0. В этом случае:

$$q_{V\text{ст}}^{\max}(R^*) = \Delta E \cdot \Phi(R^*, 0) \cdot \sum_{n,\alpha} \cdot 0{,}33, \qquad (2.32)$$

Результаты расчета представлены в табл. 10.

Таблица 10

i	1	2	3	4	5
R_i, м	0	0,3075	0,6150	0,9225	1,2300
$q_{V\text{ст}}^{\max}(R_i), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$	$1{,}258 \cdot 10^9$	$1{,}186 \cdot 10^9$	$0{,}983 \cdot 10^9$	$0{,}683 \cdot 10^9$	$0{,}337 \cdot 10^9$

Расчет распределения температуры
на наиболее энергонапряженном участке поглощающего стержня

Температуру поверхности стержня можно определить по соотношению

$$t_{\text{ст}}^{n} = \overline{t_{\text{ТН}}} + \frac{q_{V\text{ст}}^{\max} \cdot R_{\text{ст}}}{2 \cdot \bar{\alpha}}, \tag{2.33}$$

где $\overline{t_{\text{ТН}}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} = 270\ ^{\circ}C$ – средняя температура теплоносителя,

$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{I} \alpha_i}{I} = 1{,}585 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ – средний коэффициент теплоотдачи,

$R_{\text{ст}} = 0{,}5$ см – радиус поглощающего стержня.

Распределение температуры по радиусу стержня, расположенного на расстоянии R^* от оси АЗ, описывается соотношением:

$$t_{\text{ст}}(r) = t_{\text{ст}}^{n} + \frac{q_{V\text{ст}}^{\max}}{4 \cdot \lambda_{\text{ст}}(t_{\text{ст}}^{n})} \cdot (R_{\text{ст}}^2 - r^2),\ 0 \le r \le R_{\text{ст}}, \tag{2.34}$$

где $\lambda_{\text{ст}}(t_{\text{ст}}^{n})$ – коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнен стержень при температуре $t_{\text{ст}}^{n}$.

Температура в центре стержня вычисляется по формуле:

$$t_{\text{ст}}^{\text{ц}} = t_{\text{ст}}^{n} + \frac{q_{V\text{ст}}^{\max} \cdot R_{\text{ст}}^2}{4 \cdot \lambda_{\text{ст}}(t_{\text{ст}}^{n})}. \tag{2.35}$$

Результаты расчетов представлены в табл. 11.

Таблица 11

i	R_i, м	$t_{\text{ст}}^{n}$, $^{\circ}C$	$\lambda_{\text{ст}}(t_{\text{ст}}^{n})$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$t_{\text{ст}}^{\text{ц}}$, $^{\circ}C$
1	0	468,444	19,723	867,108
2	0,3075	457,130	19,935	829,067
3	0,6150	425,120	20,535	724,420
4	0,9225	377,832	21,422	577,282
5	1,2300	323,159	22,447	416,992

Распределение температуры в центральном стержне СУЗ по радиусу представлено в приложении II.

Гидравлический расчет кассеты

Для прокачки теплоносителя через кассету реактора с необходимой скоростью следует создать соответствующий перепад давления.

Для расчета гидравлического сопротивления кассеты обычно используется выражение:

$$\Delta P_{\text{кассеты}} = \sum_i \Delta P_{\text{Т}i} + \sum_j \Delta P_{\text{М}j}, \tag{2.36}$$

где $\Delta P_{\text{Т}i}$ – сопротивление трения на $i-$м участке кассеты,

$\Delta P_{\text{М}j}$ – местное сопротивление (входные и выходные устройства, сужения, дистанцирующие решетки, изгибы и т. д.).

Сопротивление трения на $i-$м участке:

$$\Delta P_{\text{Т}i} = \frac{\xi_i \cdot \Delta z_i}{d_{\text{э}i}} \cdot \left(\frac{\gamma_i \cdot \upsilon_i^2}{2} \right), \tag{2.37}$$

где ξ_i – коэффициент трения на *i*-м участке,

Δz_i и $d_{\text{э}i}$ – длина и эквивалентный диаметр *i*-го участка кассеты,

γ_i и υ_i – плотность и скорость теплоносителя на *i*-м участке.

Коэффициент трения в пучках твэл (для треугольной решетки)

$$\xi_i = \xi_{\text{тр}} \cdot \left[0{,}57 + 0{,}18 \cdot (x-1) + 0{,}53 \cdot \left(1 - \exp(-a)\right) \right], \tag{2.38}$$

где $\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент трения для круглой трубы:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{1}{\left(1{,}82 \cdot \log(\text{Re}_i) - 1{,}64\right)^2}, \tag{2.39}$$

x – отношение расстояния между центрами соседних твэл к диаметру твэл,

$$a = \begin{cases} 0{,}58 \cdot \left[1 - \exp\left(-70 \cdot (x-1)\right)\right] + 9{,}2 \cdot (x-1) & \text{при } x < 1{,}02, \\ 0{,}58 + 9{,}2 \cdot (x-1) & \text{при } x > 1{,}02. \end{cases} \tag{2.40}$$

Предположим, что дистанцирующая решетка состоит из стержней, расположенных под углом атаки ноль градусов. Тогда для расчета местного сопротивления воспользуемся следующей формулой:

$$\Delta P_{\text{М}j} = \xi_j \cdot \left(\frac{\gamma_j \cdot \upsilon_j^2}{2} \right), \tag{2.41}$$

где коэффициент сопротивления ξ_j определяется из справочной литературы [5].

Результаты расчетов представлены в табл. 12.

Таблица 12

i	ξ_i	ξ_j	$\Delta P_{\text{Т}i}$, Па	$\Delta P_{\text{М}j}$, Па
1	–	1,13	–	$3{,}832\cdot10^4$
2	0,01378	–	$1{,}0595\cdot10^4$	–
3	0,01376	–	$1{,}0628\cdot10^4$	–
4	0,01374	–	$1{,}0670\cdot10^4$	–
5	0,01371	–	$1{,}0717\cdot10^4$	–
6	–	1,13	–	$5{,}909\cdot10^4$
7	0,01366	–	$1{,}0806\cdot10^4$	–
8	0,01364	–	$1{,}0839\cdot10^4$	–
9	0,01363	–	$1{,}0860\cdot10^4$	–
10	0,01362	–	$1{,}0868\cdot10^4$	–

Эпюра перепада давлений по кассете приведена в приложении II.

Подставляя в формулу (2.36) сопротивления трения, а также местные сопротивления получим:

$$\Delta P_{\text{кассеты}} = \sum_i \Delta P_{\text{Т}i} + \sum_j \Delta P_{\text{М}j} = 8{,}598\cdot10^4 + 9{,}741\cdot10^4 = 1{,}834\cdot10^5 \text{ Па}.$$

Мощность, необходимая для прокачки теплоносителя через АЗ реактора,

$$N_{\text{ТН}} = n_{\text{кассет}} \cdot \frac{G\cdot\Delta P_{\text{кассеты}}}{\eta\cdot\overline{\gamma}} = 379\cdot\frac{86{,}334\cdot1{,}834\cdot10^5}{0{,}95\cdot778{,}296} = 8{,}116\cdot10^6 \text{ Вт}.$$

Доля затрат энергии на прокачку теплоносителя через АЗ составляет $\frac{N_{\text{ТН}}}{N}\cdot100 = \frac{8{,}116\cdot10^6}{(1500\cdot10^6/3)}\cdot100 = 1{,}62$ % от вырабатываемой электрической мощности реактора.

Оценка критических тепловых потоков

В реакторах, охлаждаемых водой или органическими жидкостями, с целью обеспечения надежной эксплуатации твэл производится расчет критических тепловых потоков $q_{si}^{\text{крит}}$ на участках кассеты, которые сравниваются со значениями q_{si}. Если на $i-$м участке $q_{si}^{\text{крит}} > q_{si}$, то кризис теплоотдачи на данном участке отсутствует. Если на каком-либо участке последнее условие не выполняется, то это свидетельствует о возможности кризиса теплоотдачи. В этом случае все расчеты необходимо повторить, пересмотрев ряд геометрических и эксплуатационных параметров реактора [1].

Критическая тепловая нагрузка в случае водяного теплоносителя, омывающего сборку стержневых цилиндрических твэл, определяется по формуле:

$$q_{si}^{\text{крит}} = 41300 \cdot (\upsilon_i \cdot \gamma_i)^{0.5} \cdot \Delta t_{\text{н}}^{0.33} \cdot \left(\frac{V'}{V'' - V'} \right) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \qquad (2.36)$$

где t_s – температура кипящей воды при заданном давлении (15 МПа),

$V' = 0,00166 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ и $V'' = 0,01035 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ – удельные объемы пара и воды при t_s,

$\Delta t_{\text{н}} = t_s - t_{\text{вых}} = 342,12 - 280 = 62,12\ ^\circ C$.

Результаты критической тепловой нагрузки представлены в табл. 13

Таблица 13

i	1	2	3	4	5
$q_{si}^{\text{крит}}$, Вт/м^2	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$
i	6	7	8	9	10
$q_{si}^{\text{крит}}$, Вт/м^2	$2,9198 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$	$2,6372 \cdot 10^6$

Из полученных результатов можно сделать вывод: кризиса теплоотдачи ни на одном участке не наблюдается.

Эпюры $q_{si}^{\text{крит}}$ и q_{si} представлены в приложении II.

Оценка напряженного состояния элементов конструкции кассеты

Термические напряжения в трубчатой оболочке твэл

Для расчета величины термических напряжений в оболочке твэл используется выражение:

$$\sigma_{\text{об}i} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t_i}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(1 + \frac{m}{6 + 3 \cdot m} \right), \qquad (2.37)$$

где α – коэффициент линейного теплового расширения $(12 \cdot 10^{-6}\ ^\circ C^{-1})$,

E – модуль Юнга (203 ГПа),

ν – коэффициент Пуассона (0.33),

Δt_i – перепад температуры на оболочке твэл на *i*-м участке кассеты.

$$m = 1 - \frac{R_{\text{твэл внутр}}}{R_{\text{твэл внеш}}}. \qquad (2.38)$$

Результаты термических напряжений в оболочке твэл представлены в табл. 14

Таблица 14

i	1	2	3	4	5
$\sigma_{об i}$, Па	$3{,}452\cdot10^{6}$	$1{,}053\cdot10^{7}$	$1{,}702\cdot10^{7}$	$2{,}204\cdot10^{7}$	$2{,}452\cdot10^{7}$
i	6	7	8	9	10
$\sigma_{об i}$, Па	$2{,}471\cdot10^{7}$	$2{,}225\cdot10^{7}$	$1{,}728\cdot10^{7}$	$1{,}076\cdot10^{7}$	$3{,}561\cdot10^{6}$

Предельно допустимое напряжение стали составляет: $\sigma = 350$ ГПа [2]. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в рассматриваемом случае материал оболочки твэл полностью соответствует режиму работы реактора.

Расчет термических напряжений в ТТ

В стационарном режиме в предположении постоянства объемной плотности тепловыделения в цилиндрической ТТ нормальные компоненты термомеханического напряжения определяются соотношениями:

$$\sigma_{rr}(r)_i = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{\text{топ}} \cdot (1-\nu)} \cdot (r^2 - R_{\text{ТТ}}^2), \tag{2.39}$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r)_i = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{\text{топ}} \cdot (1-\nu)} \cdot (3 \cdot r^2 - R_{\text{ТТ}}^2), \tag{2.40}$$

$$\sigma_{zz}(r)_i = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{\text{топ}} \cdot (1-\nu)} \cdot (4 \cdot r^2 - 2 \cdot R_{\text{ТТ}}^2), \tag{2.41}$$

где $\lambda_{\text{топ}}$ – коэффициент теплопроводности топлива, который берется для среднего (между центром и поверхностью ТТ) значения температуры $(4{,}112\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}))$,

α – коэффициент линейного теплового расширения $(10\cdot10^{-6}\ ^{\circ}C^{-1})$,

E – модуль Юнга $(44$ ГПа$)$,

ν – коэффициент Пуассона (0,27).

Результаты расчетов $\sigma_{rr}(r)_i$, $\sigma_{\theta\theta}(r)_i$, $\sigma_{zz}(r)_i$ на наиболее энергонапряженном участке кассеты представлены в табл. 15.

Таблица 15

i	r_i, м	$\sigma_{rr}(r)_i$, Па	$\sigma_{\theta\theta}(r)_i$, Па	$\sigma_{zz}(r)_i$, Па
1	0	$-1{,}322\cdot10^{8}$	$-1{,}322\cdot10^{8}$	$-2{,}643\cdot10^{8}$
2	0,00081	$-1{,}269\cdot10^{8}$	$-1{,}163\cdot10^{8}$	$-2{,}432\cdot10^{8}$
3	0,00162	$-1{,}110\cdot10^{8}$	$-6{,}872\cdot10^{7}$	$-1{,}797\cdot10^{8}$
4	0,00243	$-8{,}458\cdot10^{7}$	$1{,}057\cdot10^{7}$	$-7{,}401\cdot10^{7}$
5	0,00324	$-4{,}758\cdot10^{7}$	$1{,}216\cdot10^{8}$	$7{,}401\cdot10^{7}$
6	0,00405	0	$2{,}643\cdot10^{8}$	$2{,}643\cdot10^{8}$

Предельно допустимое напряжение ТТ составляет:

$\sigma = (7,5 - 9,0)$ МПа [2].

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что рассмотренные условия эксплуатации топлива приводят к разрушению топливной таблетки.

3. Расчет первичной защиты реактора

Схема первичной защиты ядерного реактора представлена в приложении III.

Расчет потоков быстрых и тепловых нейтронов на поверхности активной зоны

Плотность потока быстрых нейтронов на поверхности активной зоны для $E = 1,5$ МэВ и $\nu = 2,5$ удовлетворительно определяется соотношением [1]:

$$\Phi_б = 2,02 \cdot 10^{10} \cdot \frac{N}{\sum_{а.з.} \cdot V_{а.з.}}, \qquad (3.1)$$

где N – тепловая мощность ЯР (1500 МВт),

$\sum_{а.з.}$ – сечение выведения быстрых нейтронов с энергией выше 1,5 МэВ в активной зоне,

$V_{а.з.}$ – объем активной зоны ЯР ($1,987 \cdot 10^7$ см^3).

Макроскопическое сечение выведения в объеме активной зоны определяется соотношением:

$$\sum_{а.з.} = \sum_j N_j \cdot \sigma_{выв\, j}, \qquad (3.2)$$

где N_j – ядерная концентрация $j-$го элемента в активной зоне,

$\sigma_{выв\, j}$ – микроскопическое сечение выведения для $j-$го элемента.

$$\Phi_б = 2,02 \cdot 10^{10} \cdot \frac{N}{\sum_{а.з.} \cdot V_{а.з.}} = 2,02 \cdot 10^{10} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^9}{0,393 \cdot 1,987 \cdot 10^7} = 3,881 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Поток утечки тепловых нейтронов из активной зоны равен:

$$\Phi_т = \frac{\bar{\Phi}_т \cdot \sum_a \cdot V_{а.з.}}{S_{а.з.}} \cdot B^2 \cdot L^2, \qquad (3.3)$$

где $\sum_a$ – макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов в активной зоне (0,106 см$^{-1}$),

B – геометрический параметр активной зоны ($\sqrt{0,00035}$ см$^{-1}$),

L – диффузионная длина ($\sqrt{4,281}$ см),

$S_{а.з.}$ – площадь активной зоны ЯР ($7,426 \cdot 10^4$ см^2),

$\bar{\Phi}_т$ – средний поток тепловых нейтронов в активной зоне:

$$\bar{\Phi}_т = \frac{3,1 \cdot 10^{10} \cdot N}{\sum_f \cdot V_{а.з.}} = \frac{3,1 \cdot 10^{10} \cdot 1,5 \cdot 10^9}{0,197 \cdot 1,987 \cdot 10^7} = 1,188 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

С учетом всех составляющих формулы (3.3) получаем

$$\Phi_т = \frac{\bar{\Phi}_т \cdot \sum_a \cdot V_{а.з.}}{S_{а.з.}} \cdot B^2 \cdot L^2 = 5,048 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Ослабление нейтронного излучения в первичной защите

Ослабление нейтронного излучения происходит по следующим законам:

$$\begin{gathered} \Phi_б(x) = \Phi_б(0) \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} \cdot \left(\frac{R_0}{R_0 + x} \right)^{\alpha}, \\ \Phi_т(x) = \Phi_т(0) \cdot e^{-\frac{x}{L}} + \Phi_б(0) \cdot \left[\lambda \cdot \sum_a \cdot \left(1 - \frac{L^2}{\lambda^2} \right) \right]^{-1} \cdot \left(e^{-\frac{x}{\lambda}} - e^{-\frac{x}{L}} \right), \end{gathered} \tag{3.4}$$

где $\Phi_б(x)$, $\Phi_т(x)$ – плотность потока быстрых и тепловых нейтронов на глубине x в защите,

$\Phi_б(0)$, $\Phi_т(0)$ – плотность потока быстрых и тепловых нейтронов при входе в защитный слой,

x – толщина защитного слоя,

λ – длина релаксации нейтронов,

$\left(\frac{R_0}{R_0 + x} \right)^{\alpha}$ – геометрический фактор ослабления,

R_0 – внутренний радиус кривизны защитного слоя,

α – показатель геометрии источника,

L – диффузионная длина,

$\sum_a$ – макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов в защите.

Мощность дозы, обусловленная быстрыми нейтронами на внешней поверхности бетона первичной защиты, определяется по формуле:

$$P_б = \Phi_б \cdot \beta_{бет}, \tag{3.5}$$

где $\Phi_б$ – плотность потока быстрых нейтронов за защитой,

$\beta_{бет} = 0,135 \frac{\text{мбэр/ч}}{1/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1})}$ – дозовый коэффициент.

Мощность дозы, обусловленная тепловыми нейтронами:

$$P_{т} = 2{,}95 \cdot 10^{-4} \cdot \Phi_{т}, \qquad (3.6)$$

где $\Phi_{т}$ – плотность потока тепловых нейтронов за защитой.

Результаты расчетов по ослаблению нейтронов в защите представлены в табл. 16.

Таблица 16

Нейтроны	Ф, $\frac{\text{нейтр.}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	Плотность потока нейтронов за слоем защиты					Мощность дозы, мбэр/ч
		1	2	3	4	5	
Быстрые	$3{,}881 \cdot 10^{12}$	$1{,}95 \cdot 10^{10}$	$1{,}05 \cdot 10^{9}$	$5{,}74 \cdot 10^{4}$	1,846	$5{,}809 \cdot 10^{-7}$	$7{,}842 \cdot 10^{-8}$
Тепловые	$5{,}051 \cdot 10^{11}$	$2{,}00 \cdot 10^{10}$	$7{,}63 \cdot 10^{8}$	$3{,}88 \cdot 10^{5}$	34,99	$1{,}112 \cdot 10^{-5}$	$3{,}281 \cdot 10^{-9}$

Допустимая плотность потока быстрых нейтронов за защитой равна:

$$\Phi_{\text{б доп}} = 2 \frac{\text{нейтр.}}{(\text{см}^2 \cdot \text{с})}.$$

Допустимая плотность потока тепловых нейтронов за защитой равна:

$$\Phi_{\text{т доп}} = 20 \frac{\text{нейтр.}}{(\text{см}^2 \cdot \text{с})}.$$

На основании допустимых плотностей потока быстрых и тепловых нейтронов, а также табл. 16 следует, что результаты не превышает допустимых значений.

Расчет мощности гамма-излучения активной зоны (первичное гамма-излучение)

В проектных расчетах непрерывный энергетический спектр аппроксимируют суперпозицией моноэнергетических источников. Таким образом, весь диапазон энергий гамма-излучения разбивается на отдельные группы с интервалом ΔE_i и средней энергией $\overline{E}_i$.

В данном случае спектр гамма излучения разобьем на 5 групп, а именно: $E = 0 \div 1$; $1 \div 3$; $3 \div 5$; $5 \div 7$; >7 МэВ.

Средняя удельная мощность источников гамма-излучения осколков деления с энергией от E_1 до E_2 в активной зоне работающего реактора вычисляется по формуле:

$$\overline{q}_{\text{дел}} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10} \cdot N}{V_{а.з.}} \int_{E_1}^{E_2} S_{\text{дел}}(E)\, dE \quad \frac{\text{МэВ}}{(\text{см}^3 \cdot \text{с})}, \qquad (3.7)$$

где $\int_{E_1}^{E_2} S_{\text{дел}}(E)\, dE$ – выход энергии гамма-излучения на одно деление в интервале от E_1 до E_2.

Результаты расчетов по формуле (3.7) представлены в табл. 17.

Таблица 17

ΔE_i, МэВ	0–1	1–3	3–5	5–7	>7
$\int_{E_1}^{E_2} S_{\text{дел}}(E)\,dE$	7,2	6,37	1,0	0,28	0,025
$\overline{q}_{\text{дел}}$, $\frac{\text{МэВ}}{(\text{см}^3 \cdot \text{с})}$	$1{,}74 \cdot 10^{13}$	$1{,}54 \cdot 10^{13}$	$2{,}42 \cdot 10^{12}$	$6{,}77 \cdot 10^{11}$	$6{,}04 \cdot 10^{10}$

Мощность источников гамма-излучения деления (мгновенного и осколков деления) резко падает с увеличением энергии. Поэтому определяющий вклад в гамма-излучение из активной зоны в области энергий более 3 МэВ вносит захватное гамма-излучение. Для приближённой оценки источников захватного гамма-излучения из активной зоны реактора на тепловых нейтронах можно использовать выражение:

$$\overline{q}_{\text{зах}} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10} \cdot N}{V_{а.з.}} \cdot \sum_j \frac{\sum_j (n,\gamma)}{\sum_f^5} \cdot \int_{E_1}^{E_2} S_{\text{зах}}^j (E)\,dE \quad \frac{\text{МэВ}}{(\text{см}^3 \cdot \text{с})}, \tag{3.8}$$

где $\sum_j (n,\gamma)$ – макроскопическое сечение радиационного захвата теплового нейтрона на ядрах j-го элемента,

$\sum_f^5$ – макроскопическое сечение деления U^{235},

$\int_{E_1}^{E_2} S_{\text{зах}}^j (E)\,dE$ – выход энергии захватного гамма-излучения в интервале $E_1 \le E \le E_2$ при захвате j-го элемента.

Спектр гамма-излучения при радиационном захвате тепловых нейтронов представлен в табл. 18.

Таблица 18

Материал	$\sigma(n,\gamma)$, барн	$\int_{E_1}^{E_2} S_{\text{зах}}(E)dE$				
		$0 \div 1$	$1 \div 3$	$3 \div 5$	$5 \div 7$	>7
H	0,335	0	1	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0
Cr	3,1	0,85	0,62	0,12	0,23	0,045
Fe	2,62	0,75	0,87	0,23	0,25	0,4
Ni	4,6	0,84	0,63	0,23	0,34	0,63
U^{238}	2,71	2,54	2,69	0,34	0	0

Интенсивность гамма-излучения энергии E_i на поверхности активной зоны в приближении полубесконечного однородного источника определяется по формуле:

$$I(E_i) = \frac{\overline{q}(E_i)}{2 \cdot \text{м}(E_i)} \cdot \left(\frac{A_1(E_i)}{1 + \text{б}_1(E_i)} + \frac{1 - A_1(E_i)}{1 + \text{б}_2(E_i)} \right) \text{МэВ}, \qquad (3.9)$$

где i – число интервалов разбиения спектра гамма-излучения ($i = 5$),

$\text{м}(E_i)$ – расчетный линейный коэффициент ослабления гамма-излучения энергии E_i в активной зоне,

$A(E_i)$, $\text{б}_1(E_i)$, $\text{б}_2(E_i)$ – расчетные коэффициенты экспоненциального представления энергетического фактора накопления гамма-излучения в активной зоне [7].

$$\overline{q}(E_i) = \overline{q}_{\text{дел}}(E_i) + \overline{q}_{\text{зах}}(E_i).$$

Результаты расчетов гамма-излучения активной зоны (первичного гамма-излучения), падающего на защиту представлены в табл. 19.

Таблица 19

ΔE_i, МэВ	$\overline{q}_{\text{дел}}$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\overline{q}_{\text{зах}}$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\overline{q}$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\mu_l(E_i)$	$A(E_i)$,	$\alpha_1(E_i)$,	$\alpha_2(E_i)$,	$I_{\text{перв}}(E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$
0÷1	$1{,}74 \cdot 10^{13}$	$4{,}26 \cdot 10^{12}$	$2{,}17 \cdot 10^{13}$	0,0966	24	–0,138	0	$5{,}43 \cdot 10^{14}$
1÷3	$1{,}54 \cdot 10^{13}$	$4{,}51 \cdot 10^{12}$	$1{,}99 \cdot 10^{13}$	0,0494	6,4	–0,076	0,092	$3{,}99 \cdot 10^{14}$
3÷5	$2{,}42 \cdot 10^{12}$	$8{,}74 \cdot 10^{11}$	$3{,}29 \cdot 10^{12}$	0,0340	4,5	–0,056	0,117	$7{,}91 \cdot 10^{13}$
5÷7	$6{,}77 \cdot 10^{11}$	$7{,}71 \cdot 10^{11}$	$1{,}45 \cdot 10^{12}$	0,0277	3,6	–0,05	0,124	$3{,}86 \cdot 10^{13}$
>7	$6{,}04 \cdot 10^{10}$	$1{,}32 \cdot 10^{13}$	$1{,}38 \cdot 10^{12}$	0,0243	3	–0,045	0,128	$3{,}89 \cdot 10^{13}$

Расчет захватного (вторичного) гамма-излучения в защите

Плотность генерации захватного гамма-излучения, рождающегося в защитных слоях, определяется пространственным распределением плотности потоков тепловых нейтронов в этих слоях. При этом интенсивность потока захватного излучения с энергией E_i на поверхности слоя защиты, генерирующего захватное гамма-излучение, вычисляется по формуле:

$$I_{\text{зах}}(E) = \Phi_{\text{т}}(0) \cdot K \cdot \text{У}_j(n, \text{г}) \cdot \int_{E_1}^{E_2} S^j_{\text{зах}}(E)\, dE, \qquad (3.10)$$

где $\Phi_{\text{т}}(0)$ – плотность потока тепловых нейтронов при входе в слой,

K – функция, учитывающая форму распределения плотности потока тепловых нейтронов по толщине слоя защиты.

Законы изменения плотности потока тепловых нейтронов:

Закон № 1. Если плотность потока нейтронов в слое изменяется по закону:

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot \exp\left(\text{У}_\text{а} \cdot x\right),$$

то функция K имеет вид:

$$K = \frac{1}{2 \cdot \Sigma_a} \cdot \left(\ln \left| \frac{\mu - \Sigma_a}{\mu} \right| - \exp(\Sigma_a \cdot d) \cdot E_1(\mu \cdot d) + E_1\left[(\mu - \Sigma_a) \cdot d\right] \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Sigma_a}{(\mu - \Sigma_a)} \cdot \left[1 - \exp\left(-(\mu - \Sigma_a) \cdot d\right)\right].$$

Закон № 2. Если плотность нейтронов в слое изменяется по закону:

$$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot \exp\left(-\Sigma_\text{а} \cdot x\right),$$

то функция K имеет вид:

$$K = \frac{1}{2 \cdot \Sigma_a} \cdot \left(\ln \left| \frac{\mu + \Sigma_a}{\mu} \right| - \exp(\Sigma_a \cdot d) \cdot E_1(\mu \cdot d) + E_1\left[(\mu + \Sigma_a) \cdot d\right] \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Sigma_a}{(\mu + \Sigma_a)} \cdot \left[1 - \exp\left(-(\mu + \Sigma_a) \cdot d\right)\right].$$

Закон №3. Когда распределение плотности потока нейтронов по толщине слоя может рассматриваться как равномерное (например, тонкий слой толщиной не более трех длин свободного пробега излучения), функция K упрощается:

$$K = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \left[1 - E_2\left(\mu \cdot d\right)\right],$$

где d – толщина защитного слоя,

E_1 – интегральная экспонента,

E_2 – функция Кинга,

μ – линейный коэффициент ослабления квантов,

$\Sigma_\text{а}$ – макроскопическое сечение поглощения нейтрона.

Результаты расчетов представлены в табл. 19.

Таблица 19

Зашита	$\Phi_\text{т}(0)$, $\frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$	ΔE_i, МэВ	$\int_{E_1}^{E_2} S^j_{\text{зах}}(E)\,dE$	μ	$\mu \cdot d$	K	$I_{\text{зах}}(E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$
ЖВЗ (40 см)	$5.05 \cdot 10^{11}$	$0 \div 1$	0	0,272	10,88		
		$1 \div 3$	1	0,216	8,64	1,497	$8{,}63 \cdot 10^{10}$
		$3 \div 5$	0	0,203	8,12		
		$5 \div 7$	0	0,177	7,08		
		> 7	0	0,170	6,8		
Суммарная интенсивность гамма-излучения: $8{,}63 \cdot 10^{10}$ $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.							

Окончание табл. 19

Зашита	$\Phi_т(0)$, $\frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$	ΔE_i, МэВ	$\int_{E_1}^{E_2} S^j_{\text{зах}}(E)\,dE$	μ	$\mu \cdot d$	K	$I_{\text{зах}}(E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$
Корпус (20 см)	$2.00 \cdot 10^{10}$	0 ÷ 1	0,75	0,659	13,18	0,759	$1{,}80 \cdot 10^{9}$
		1 ÷ 3	0,87	0,333	6,66	1,501	$4{,}14 \cdot 10^{9}$
		3 ÷ 5	0,23	0,259	5,18	1,929	$1{,}41 \cdot 10^{9}$
		5 ÷ 7	0,25	0,239	4,78	2,089	$1{,}65 \cdot 10^{9}$
		> 7	0,4	0,232	4,64	2,152	$2{,}73 \cdot 10^{9}$
Суммарная интенсивность гамма-излучения: $1.17 \cdot 10^{10}$ $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.							
Вода (100 см)	$7.63 \cdot 10^{8}$	0 ÷ 1	0	0,0966	9,66		
		1 ÷ 3	1	0,0494	4,94	7,959	$6{,}81 \cdot 10^{7}$
		3 ÷ 5	0	0,0340	3,40		
		5 ÷ 7	0	0,0277	2,77		
		> 7	0	0,0243	2,43		
Суммарная интенсивность гамма-излучения: $6{,}81 \cdot 10^{7}$ $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.							
Бетон (130 см)	$3.88 \cdot 10^{5}$	0 ÷ 1	0	0,204	26,52	2,378	
		1 ÷ 3	0,31	0,104	13,52	4,574	$6{,}17 \cdot 10^{3}$
		3 ÷ 5	0,17	0,0745	9,685	6,286	$4{,}65 \cdot 10^{3}$
		5 ÷ 7	0,412	0,063	8,19	7,357	$1{,}32 \cdot 10^{4}$
		> 7	0,216	0,0571	7,423	8,059	$7{,}57 \cdot 10^{3}$
Суммарная интенсивность гамма-излучения: $3{,}16 \cdot 10^{4}$ $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.							
Бетон (190 см)	34.99	0 ÷ 1	0	0,204	38,76	2,378	
		1 ÷ 3	0,31	0,104	19,76	4,574	$5{,}56 \cdot 10^{-1}$
		3 ÷ 5	0,17	0,0745	14,155	6,286	$4{,}19 \cdot 10^{-1}$
		5 ÷ 7	0,412	0,063	11,97	7,362	1,19
		> 7	0,216	0,0571	10,849	8,070	$6{,}84 \cdot 10^{-1}$
Суммарная интенсивность гамма-излучения: 2,85 $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.							

Расчет прохождения гамма-излучения через защиту

Чтобы определить ослабление интенсивности гамма-излучения отдельно взятой энергии E_i, в многослойной защите, можно воспользоваться формулой [7]:

$$I(d,E_i) = I(0,E_i)\cdot\exp(-\mu\cdot d)\cdot B(E,\mu\cdot d), \qquad (3.11)$$

где $I(0,E_i)$ – интенсивность гамма-излучения энергии E_i при входе в защиту,

$B(E,\mu\cdot d) = A_1\cdot\exp(-\alpha_1\cdot\mu\cdot d) + A_2\cdot\exp(-\alpha_2\cdot\mu\cdot d)$ – фактор накопления квантов энергии E_i в слое защиты,

d – общая толщина защиты,

μ – линейный коэффициент ослабления $i-$го слоя защиты,

$\mu\cdot d$ – число пробегов гамма-излучения энергии E_i в защите,

α_1, α_2, $A_2 = (1-A_1)$ – численные коэффициенты, не зависящие от $\mu\cdot d$.

Результаты расчетов представлены в табл. 20.

Таблица 20

Зашита	ΔE_i, МэВ	$I(0,E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2\cdot\text{с}}$	$\exp(-\mu\cdot d)$	$A_1(E_i)$	$-\alpha_1(E_i)$	$\alpha_2(E_i)$	$B(E_i,\mu\cdot d)$	$I(d,E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2\cdot\text{с}}$
ЖВЗ (40 см)	$0\div1$	$5,43\cdot10^{14}$	$1,883\cdot10^{-5}$	14,2	0,1078	0,0084	16,4436	$1,68\cdot10^{11}$
	$1\div3$	$3,99\cdot10^{14}$	$1,769\cdot10^{-4}$	3,9	0,0840	0,1800	2,4998	$1,77\cdot10^{11}$
	$3\div5$	$7,91\cdot10^{13}$	$2,975\cdot10^{-4}$	3,25	0,0860	0,1340	2,3746	$5,59\cdot10^{10}$
	$5\div7$	$3,86\cdot10^{13}$	$8,418\cdot10^{-4}$	2,45	0,0930	0,1140	1,9152	$6,22\cdot10^{10}$
	>7	$3,89\cdot10^{13}$	$1,114\cdot10^{-3}$	2,45	0,0840	0,1530	1,9962	$8,21\cdot10^{10}$
Корпус (20 см)	$0\div1$	$1,68\cdot10^{11}$	$1,888\cdot10^{-6}$	10	0,0948	0,0120	10,5500	$3,35\cdot10^{6}$
	$1\div3$	$2,63\cdot10^{11}$	$1,281\cdot10^{-3}$	5,5	0,0788	0,0700	6,0774	$2,05\cdot10^{9}$
	$3\div5$	$5,59\cdot10^{10}$	$5,628\cdot10^{-3}$	3,75	0,0750	0,0820	4,3411	$1,36\cdot10^{9}$
	$5\div7$	$6,22\cdot10^{10}$	$8,396\cdot10^{-3}$	2,9	0,0820	0,0750	3,2872	$1,72\cdot10^{9}$
	>7	$8,21\cdot10^{10}$	$9,658\cdot10^{-3}$	2,35	0,0830	0,0550	2,6448	$2,10\cdot10^{9}$
Вода (100 см)	$0\div1$	$1,81\cdot10^{9}$	$6,378\cdot10^{-5}$	24	0,1380	0	29,3279	$3,38\cdot10^{6}$
	$1\div3$	$6,18\cdot10^{9}$	$7,155\cdot10^{-3}$	6,4	0,0760	0,0920	7,8245	$3,46\cdot10^{8}$
	$3\div5$	$2,77\cdot10^{9}$	$3,337\cdot10^{-2}$	4,5	0,0560	0,1170	6,0711	$5,61\cdot10^{8}$
	$5\div7$	$3,37\cdot10^{9}$	$6,266\cdot10^{-2}$	3,6	0,0500	0,0124	4,9786	$1,05\cdot10^{9}$
	>7	$4,82\cdot10^{9}$	$8,804\cdot10^{-2}$	2,7	0,0420	0,1300	3,6776	$1,56\cdot10^{9}$

Окончание табл. 20

Зашита	ΔE_i, МэВ	$I(0,E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2\cdot\text{с}}$	$\exp(-\mu\cdot d)$	$A_1(E_i)$	$-\alpha_1(E_i)$	$\alpha_2(E_i)$	$B(E_i,\mu\cdot d)$	$I(d,E_i)$, $\frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2\cdot\text{с}}$
Бетон (130 см)	$0\div1$	$3,38\cdot10^{6}$	$5,136\cdot10^{-14}$	104,065	0,0639	–0,0442	413,6555	$7,18\cdot10^{-8}$
	$1\div3$	$4,14\cdot10^{8}$	$1,679\cdot10^{-7}$	39,3072	0,0247	–0,0016	66,0340	$4,59\cdot10^{2}$
	$3\div5$	$5,61\cdot10^{8}$	$1,402\cdot10^{-5}$	14,2241	0,0222	0,0232	21,3038	$1,68\cdot10^{4}$
	$5\div7$	$1,05\cdot10^{8}$	$7,869\cdot10^{-5}$	8,8694	0,0236	0,0313	12,9511	$1,07\cdot10^{6}$
	>7	$1,56\cdot10^{8}$	$1,907\cdot10^{-4}$	7,0033	0,0230	0,0332	10,2654	$3,06\cdot10^{6}$
Бетон (190 см)	$0\div1$	$7,18\cdot10^{-5}$	$1,468\cdot10^{-17}$	104,065	0,0639	–0,0442	581,0667	$6,12\cdot10^{-19}$
	$1\div3$	$1,08\cdot10^{4}$	$2,620\cdot10^{-9}$	39,3072	0,0247	–0,0016	63,6899	$1,80\cdot10^{-3}$
	$3\div5$	$1,72\cdot10^{5}$	$7,121\cdot10^{-7}$	14,2241	0,0222	0,0232	19,9118	2,44
	$5\div7$	$1,08\cdot10^{6}$	$6,331\cdot10^{-6}$	8,8694	0,0236	0,0313	12,0974	$8,31\cdot10^{1}$
	>7	$3,06\cdot10^{6}$	$1,942\cdot10^{-5}$	7,0033	0,0230	0,0332	9,6406	$5,74\cdot10^{2}$

Расчет мощности дозы гамма-излучения за защитой

Мощность экспозиционной дозы, создаваемой гамма-излучением в воздухе, можно рассчитать по формуле:

$$P=\sum_i P_i=14\cdot I_i\cdot\gamma_{\text{в}i}, \tag{3.12}$$

где i – индекс группы квантов энергии E_i,

I_i – интенсивность группы квантов,

$\gamma_{\text{в}i}$ – линейный коэффициент преобразования энергии квантов в воздухе.

Результаты расчетов по формуле (3.12) представлены в табл. 21.

Таблица 21

ΔE_i, МэВ	$0\div1$	$1\div3$	$3\div5$	$5\div7$	>7
$\gamma_{\text{в}i}$, 10^{-3} см$^{-1}$	0,0387	0,0303	0,0239	0,0211	0,0203
P_i, мкР/с	$3,32\cdot10^{-22}$	$7,62\cdot10^{-7}$	$8,17\cdot10^{-4}$	$2,45\cdot10^{-2}$	$1,63\cdot10^{-1}$

Из полученных результатов следует: суммарная мощность дозы за защитой равна $\sum_i P_i=0,188$ мкР/с $=0,6768$ мР/ч. Данная мощность экспозиционной дозы меньше максимально допустимой (0,7 мР/ч).

Расчет радиационной защиты корпуса реактора

Функциональное назначение радиационной защиты корпуса – обеспечение его заданного радиационного ресурса, который определяется допустимым флюенсом нейтронов за весь срок службы корпуса.

Для ВВЭР радиационное повреждение корпуса обуславливается нейтронами с энергией 0,5 МэВ и проявляется в охрупчивании стенок (повышение температуры хладноломкости).

При известном допустимом флюенсе и спектре нейтронов радиационный ресурс корпуса равен:

$$T_{\text{рес}} = \frac{F_{\text{доп}}}{\Phi_{\text{корп}} \cdot \text{КИМ}} \ \text{с}, \tag{3.12}$$

где $\Phi_{\text{корп}}$ – плотность потока нейтронов, падающих на корпус при работе реактора на номинальной мощности,

$F_{\text{доп}}$ – допустимый флюенс нейтронов ($F_{\text{доп}} = 3 \cdot 10^{20}$ см$^{-2}$ при энергии нейтронов не менее 0,5 МэВ),

КИМ – коэффициент использования мощности реактора (0,7–0,9).

В результате вычислений радиационный ресурс корпуса составил: $T_{\text{рес}} = 41{,}8$ лет.

Расчет радиационно-стимулированного тепловыделения в защите

Случай 1. Радиационно-стимулированное тепловыделение в корпусе реактора

Функцию тепловой защиты корпуса выполняют специальные экраны, суммарная толщина которых должна быть достаточной для ослабления гамма-излучения активной зоны. Граничным значением безопасного тепловыделения в корпусе ВВЭР считают $0{,}1$ Вт $\cdot$ см^3.

Плотность источников радиационного тепловыделения, обусловленного поглощением энергии излучения в материалах защиты и оборудования, можно представить в виде трех компонент:

$$q_{\text{корп}} = q_{\text{упр}} + q_{\text{зах}} + q_{\gamma} \le 0{,}1 \ \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}. \tag{3.13}$$

Тепловыделение от замедляющихся нейтронов:

$$q_{\text{упр}} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{\Phi_{\text{б}} \cdot E_{\text{ср}}}{L_{\text{зам}}} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{1{,}95 \cdot 10^{10} \cdot 15}{15} = 3{,}12 \cdot 10^{-3} \ \frac{\text{Вт}}{\text{см}^{-3}}.$$

Тепловыделение от захватного взаимодействия тепловых нейтронов с материалом защиты:

$$q_{\text{зах}} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot \Delta\Phi_{\text{т}} \cdot E_{\text{св}} \cdot \mu_{\text{а}} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \cdot 1{,}92 \cdot 10^{10} \cdot 7 \cdot 0{,}16 = 3{,}45 \cdot 10^{-3} \ \frac{\text{Вт}}{\text{см}^{-3}},$$

где $\Delta\Phi_т$ – поглощенная часть плотности потока нейтронов,

$E_{св}$ – энергия связи нейтронов в ядрах защитного материала ($E_{св} = 7$ МэВ),

$\mu_а$ – коэффициент истинного поглощения квантов энергии $E = E_{св}$.

Гамма-составляющую тепловыделения определяют по формуле:

$$q_\gamma = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot \sum \mu_а(E_i) \cdot \left[I_{перв}(E_i) + I_{втор}(E_i) \right] \cdot B_E(E_i) = 0,072 \ \frac{Вт}{см^{-3}},$$

где $B_E(E_i)$ – энергетический фактор накопления квантов энергии E_i,

$\mu_а(E_i)$ – коэффициенты истинного поглощения квантов энергии E_i.

На основании выше изложенных составляющих формулы (3.13) суммарное тепловыделение равно: $q_{корп} = 0,0786 \ \frac{Вт}{см^{-3}}$.

Исходя из граничного значения безопасного тепловыделения в корпусе, а также из полученного результата можно сделать вывод: условие безопасной эксплуатации корпуса соблюдается.

Случай 2. Радиационно-стимулированное тепловыделение в корпусе реактора

Радиационный разогрев бетона в основном обусловлен поглощением нейтронов тепловых энергий и гамма-излучения.

$$q_{бет} = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot \left[\Delta\Phi_т \cdot E_{св} + \sum_i \Delta I^*(E_i) \right] = 5,64 \cdot 10^{-4} \ \frac{Вт}{см^{-3}},$$

где $\Delta\Phi_т$ – поглощенная в бетоне часть плотности потока тепловых нейтронов,

$E_{св}$ – энергия связи, освобождающаяся в бетоне при захвате нейтронов ($E_{св} = 5,3$ МэВ),

$\Delta I^*(E_i)$ – интенсивность гамма-излучения энергии E_i, поглощенная в бетоне с учетом накопления.

Определение температуры радиационного разогрева бетона

Распределение температуры в плоском бесконечном слое защиты от радиационного тепловыделения определяется решением уравнения теплопроводности:

$$-\lambda \cdot \left[\frac{d^2 \cdot T(x)}{dx^2} \right] = q(x), \qquad (3.14)$$

где $T(x)$ – распределение температуры по толщине защиты,

λ – коэффициент теплопроводности (для обычного бетона $\lambda_{бет} = 0,6 \ \frac{Вт}{м \cdot К}$),

$q(x)$ – распределение источников тепловыделения.

Для уравнения (3.14) принимаются следующие граничные условия:

$$\begin{cases} T(x) = T_0 \quad \text{при } x = 0, \\ \dfrac{dT(x)}{dx} = 0 \quad \text{при } x = \infty. \end{cases} \tag{3.15}$$

Решение уравнения (3.14) при граничных условиях (3.15) для экспоненциального распределения тепловыделения $q(x) = q_0 \cdot \exp(-k \cdot x)$ имеет вид:

$$T(x) = T(0) + \frac{q_0}{\lambda \cdot k^2} \cdot (1 - \exp(-k \cdot x)), \tag{3.16}$$

где k – коэффициент, учитывающий спад тепловыделения по толщине бетона. В обычном бетоне $k = 0,06$ см$^{-1}$.

Максимальный перепад температуры по толщине защиты составит:

$$\Delta T_{\max} = \frac{q_0}{\lambda \cdot k^2}. \tag{3.17}$$

Распределение градиента температур по толщине защиты определяется производной:

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{q_0}{\lambda \cdot k} \cdot \exp(-k \cdot x). \tag{3.18}$$

Максимальный градиент наблюдается в точке $x = 0$ и равен $\dfrac{q_0}{\lambda \cdot k}$.

Результаты расчетов представлены в табл. 22.

Таблица 22

Параметр	Тепловыделение q, Вт $\cdot$ см$^{-3}$			
	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$\Delta T_{\max}$, °C	462,96	138,89	46,296	13,889
$\left(\dfrac{dT(x)}{dx}\right)_{\max}$, °C $\cdot$ см$^{-1}$	27,778	8,333	2,778	0,833

Расчет активности теплоносителя первого контура

Различают собственную и примесную радиоактивность теплоносителя первого контура.

Собственная активность теплоносителя обусловлена активацией ядер, входящих в состав теплоносителя.

Активность теплоносителя обусловлена распадом продуктов реакции типа (n,γ), $(n,2n)$ на ядрах теплоносителя. Для H_2O характерны реакции типа: $O^{16}(n,p)N^{16}$; $O^{17}(n,p)N^{17}$.

Для определения активности необходимо рассчитать следующие величины:

время прохождения ТН через АЗ [8]:

$$t_{АЗ}=\frac{V_{ТН}}{G}\ с, \qquad (3.19)$$

где $V_{ТН}$ – объем теплоносителя в АЗ $(V_{ТН}=1{,}192\cdot10^7\ см^3)$,

G – расход через АЗ $\left(G=0{,}086\ \frac{т}{с}\right)$.

$$G_{а.з.}=\frac{N_{кассет}\cdot G}{\gamma_{H_2O}}=4{,}116\cdot10^7\ \frac{см^3}{с}$$ – объемный расход теплоносителя.

Подставляя вышеизложенные данные в формулу (3.19) получаем:

$$t_{а.з.}=\frac{V_{ТН}}{G_{а.з.}}=0{,}29\ с.$$

Период прохождения теплоносителя по контуру:

$$t_{Ц}=\frac{V_{1К}}{G_{а.з.}}=\frac{5\cdot V_{ТН}}{G_{а.з.}}=1{,}448\ с.$$

Удельная активность ТН по изотопам N^{16} и N^{17} для простейшей схемы циркуляции равна:

$$Q(t_к)=N_0\cdot\sigma_{акт}\cdot\bar{\Phi}\cdot\frac{1-\exp(-\lambda\cdot t_{а.з.})}{1-\exp(-\lambda\cdot t_ц)}\cdot\exp(-\lambda\cdot t_к),$$

где N_0 – концентрация материнских ядер (O^{16} и O^{17}),

$\sigma_{акт}$ – сечение активации материнских ядер,

$t_к$ – время движения воды до k-го участка контура,

λ – постоянная радиоактивного распада $(\lambda_{O^{16}}=0{,}0943\ с^{-1},\ \lambda_{O^{17}}=0{,}1691\ с^{-1})$.

В результате вычислений удельная активность составила:

$$Q_{N^{16}}(t_к)=4{,}399\cdot10^8\ \frac{Бк}{л},\ Q_{N^{17}}(t_к)=1{,}014\cdot10^4\ \frac{Бк}{л}.$$

Найденные значения удельной активности теплоносителя являются оценочными, так как получены для идеализированной схемы циркуляции теплоносителя и не учитывают активацию вне объема активной зоны.

Приложение I к пояснительной записке

Выходные данные программы «reactor.exe»

Реактор без поглощающего стержня

K = 1.020984

0.8559E-001	0.1535E+033	0.2059E+014	0.0000E+000
0.1248E-001	–0.2844E+033	0.4643E+014	0.2942E+027
–0.9093E-002	0.8682E+032	–0.3605E+013	0.0000E+000
–0.5319E-003	–0.6456E+032	–0.1340E+013	–0.1560E+026

Значение определителя –1.7449E+067

K = 1.020990

0.8530E-001	0.1535E+033	0.2059E+014	0.0000E+000
0.1243E-001	–0.2845E+033	0.4643E+014	0.2942E+027
–0.9094E-002	0.8682E+032	–0.3605E+013	0.0000E+000
–0.5319E-003	–0.6457E+032	–0.1340E+013	–0.1560E+026

Значение определителя +1.0232E+066

Рассчитанное значение коэффициента: 1.020987

Реактор с поглощающим стержнем

K = 1.022552

–0.3961E-001	0.4357E+034	0.5006E+000	0.1022E-034
–0.5774E-002	–0.8064E+034	0.7296E-001	–0.1891E-034
–0.2394E-003	0.2853E+000	0.3189E+000	–0.3000E+000
–0.1458E+000	0.1771E+001	0.3839E+000	0.1381E+001

Значение определителя –4.2447E+029

K = 1.022559

–0.3988E-001	0.4357E+034	0.5005E+000	0.1022E-034
–0.5813E-002	–0.8064E+034	0.7295E-001	–0.1891E-034
–0.2395E-003	0.2853E+000	0.3189E+000	–0.3000E+000
–0.1458E+000	0.1771E+001	0.3839E+000	0.1381E+001

Значение определителя +8.8102E+029

Рассчитанное значение коэффициента: 1.022556

Для активной зоны

R, см	Fбыст.	Fтепл.
0.1000E-001	0.1000E+001	0.1458E+000
0.5135E+001	0.9986E+000	0.1456E+000
0.1026E+002	0.9944E+000	0.1450E+000
0.1538E+002	0.9874E+000	0.1439E+000
0.2051E+002	0.9777E+000	0.1425E+000
0.2563E+002	0.9653E+000	0.1407E+000
0.3076E+002	0.9502E+000	0.1385E+000
0.3588E+002	0.9325E+000	0.1359E+000
0.4101E+002	0.9123E+000	0.1330E+000
0.4613E+002	0.8897E+000	0.1297E+000
0.5126E+002	0.8648E+000	0.1261E+000
0.5638E+002	0.8376E+000	0.1221E+000
0.6151E+002	0.8083E+000	0.1178E+000
0.6663E+002	0.7770E+000	0.1133E+000
0.7176E+002	0.7438E+000	0.1084E+000
0.7688E+002	0.7089E+000	0.1033E+000
0.8200E+002	0.6724E+000	0.9802E-001
0.8713E+002	0.6345E+000	0.9249E-001
0.9225E+002	0.5953E+000	0.8677E-001
0.9738E+002	0.5549E+000	0.8089E-001
0.1025E+003	0.5136E+000	0.7487E-001
0.1076E+003	0.4715E+000	0.6874E-001
0.1128E+003	0.4288E+000	0.6251E-001
0.1179E+003	0.3857E+000	0.5622E-001
0.1230E+003	0.3423E+000	0.4989E-001
0.1281E+003	0.2987E+000	0.4355E-001
0.1333E+003	0.2553E+000	0.3721E-001
0.1384E+003	0.2120E+000	0.3092E-001
0.1435E+003	0.1692E+000	0.2476E-001
0.1486E+003	0.1263E+000	0.1965E-001

Для отражателя

R, см	F быст.	F тепл.
0.1538E+003	0.7753E-001	0.2713E-001
0.1544E+003	0.6777E-001	0.3731E-001
0.1551E+003	0.5913E-001	0.4301E-001
0.1558E+003	0.5146E-001	0.4543E-001
0.1564E+003	0.4463E-001	0.4548E-001
0.1571E+003	0.3853E-001	0.4386E-001
0.1577E+003	0.3307E-001	0.4105E-001
0.1584E+003	0.2814E-001	0.3745E-001
0.1591E+003	0.2368E-001	0.3331E-001
0.1597E+003	0.1961E-001	0.2884E-001
0.1604E+003	0.1587E-001	0.2417E-001
0.1611E+003	0.1239E-001	0.1939E-001
0.1617E+003	0.9110E-002	0.1455E-001
0.1624E+003	0.5987E-002	0.9700E-002
0.1631E+003	0.2967E-002	0.4846E-002
0.1637E+003	0.5704E-015	0.9172E-015

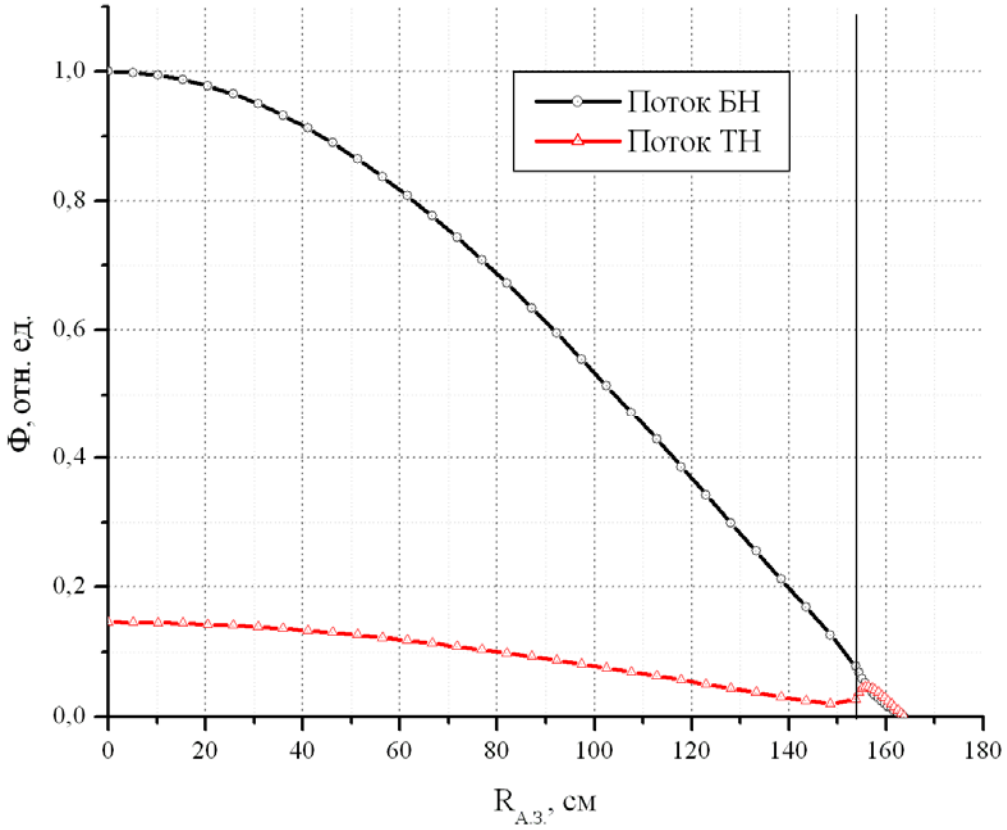


Рис. 1.1. Радиальное распределение плотности потоков быстрых и тепловых нейтронов

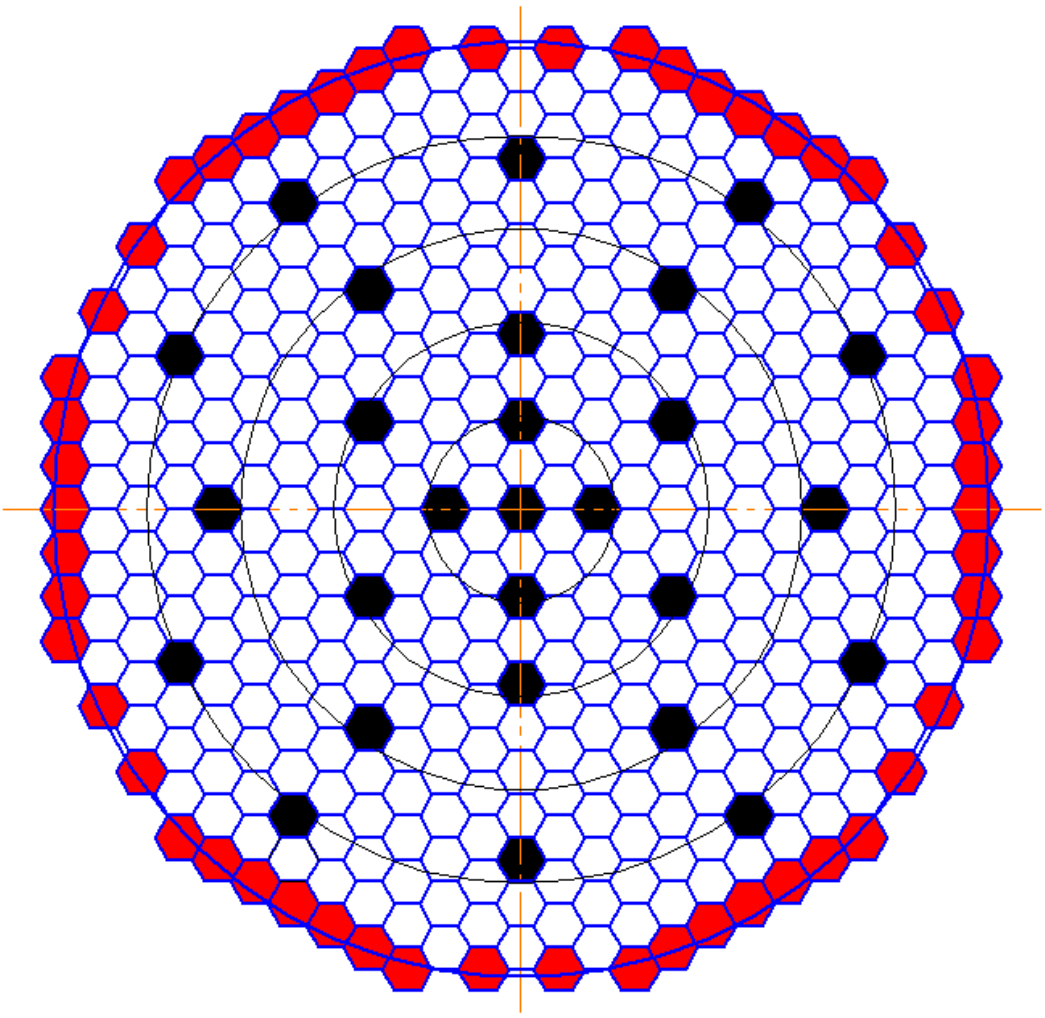


Рис. 1.2. Схема расположения стержней СУЗ в АЗ

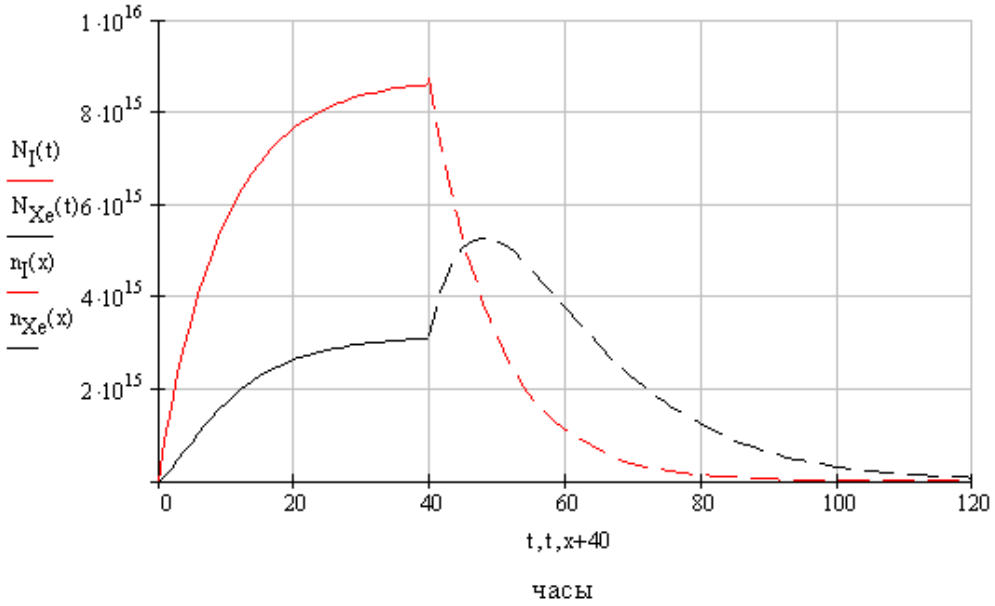


Рис. 1.3. Изменение концентраций ядер I и Xe в зависимости от времени

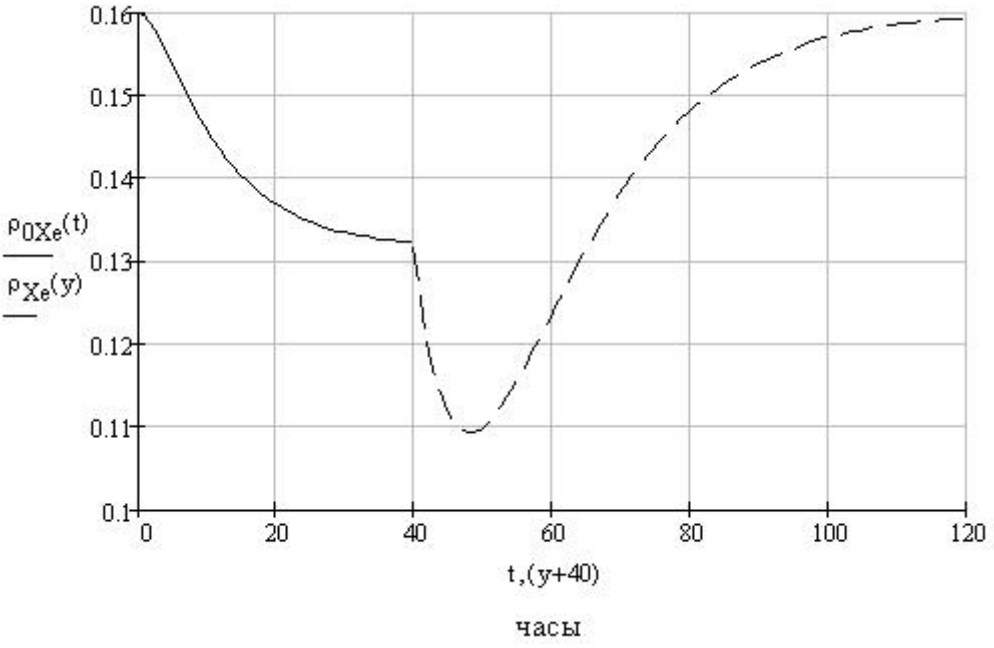


Рис. 1.4. Потеря реактивности при работе реактора на постоянной мощности и после остановки

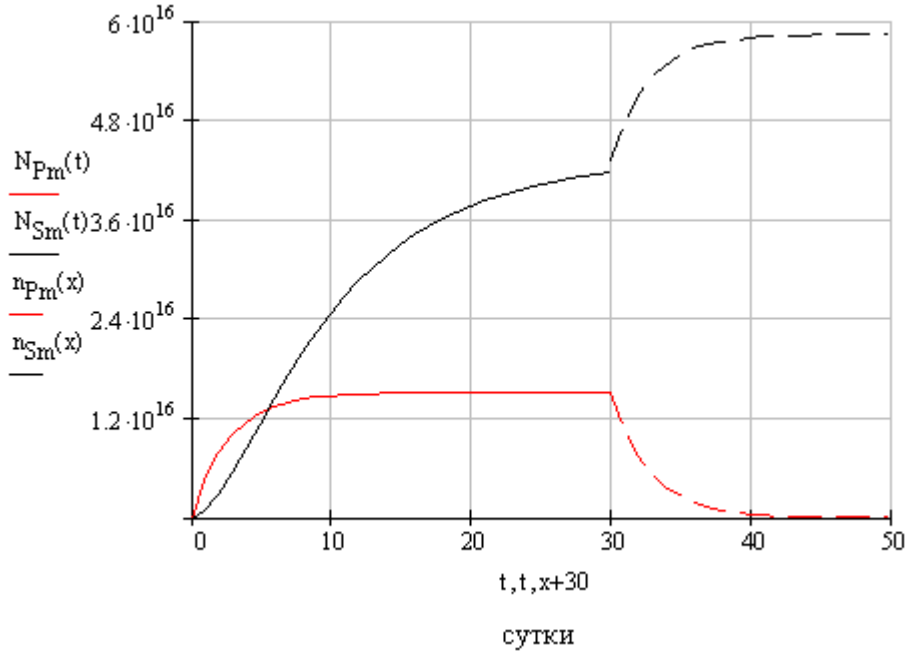


Рис. 1.5. Изменение концентраций ядер Pm и Sm в зависимости от времени

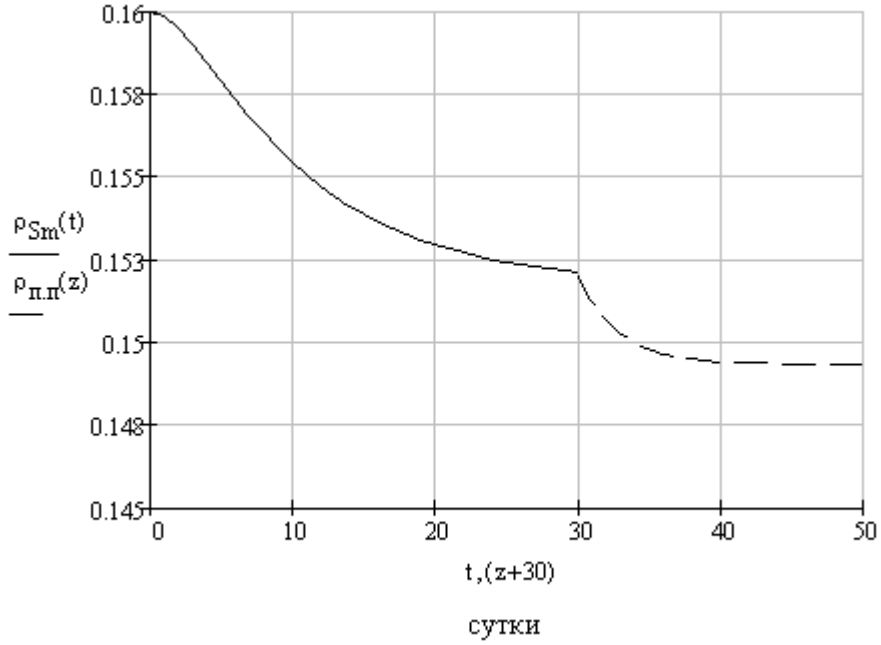


Рис. 1.6. Потеря реактивности при работе реактора на постоянной мощности и после остановки

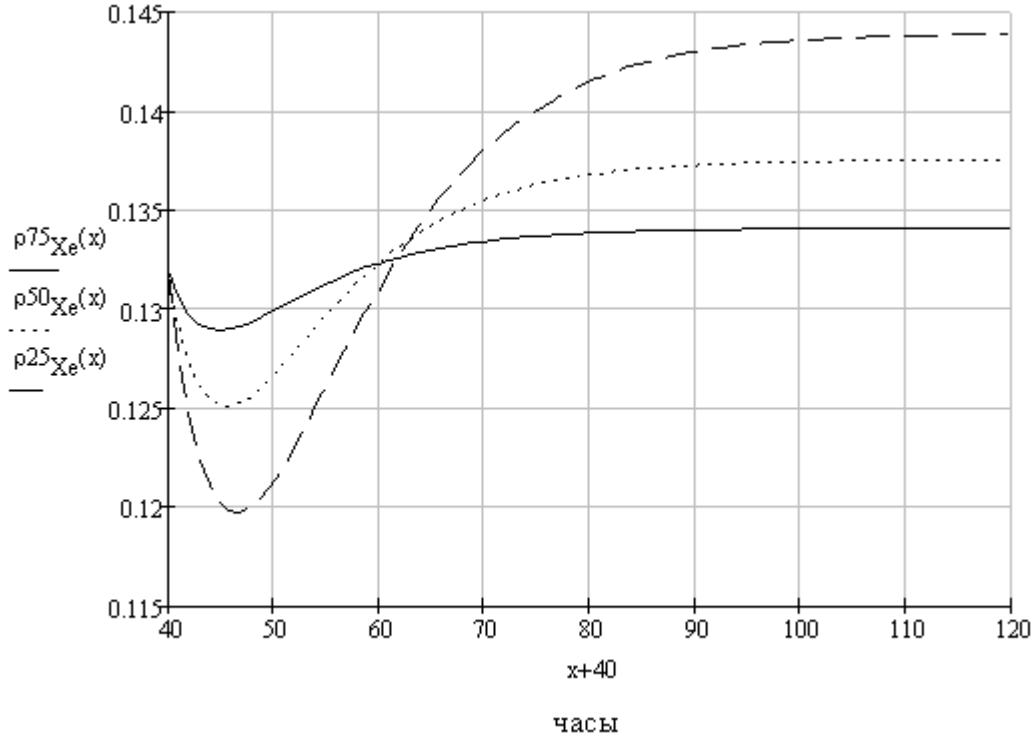


Рис. 1.7. Потеря реактивности после снижения мощности со 100 % до 75 %, 50 % и 25 %

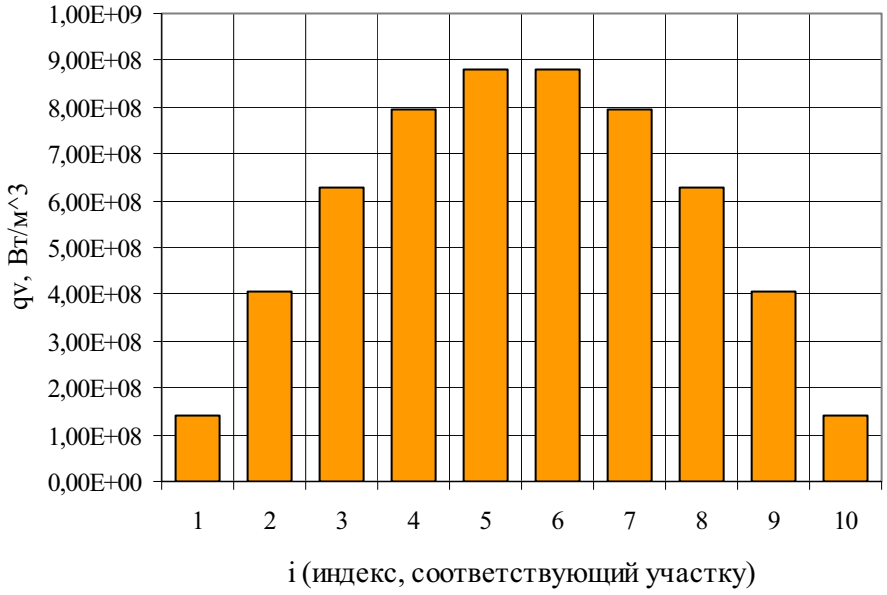


Рис. 2.1. Изменение объемной плотности тепловыделения по кассете

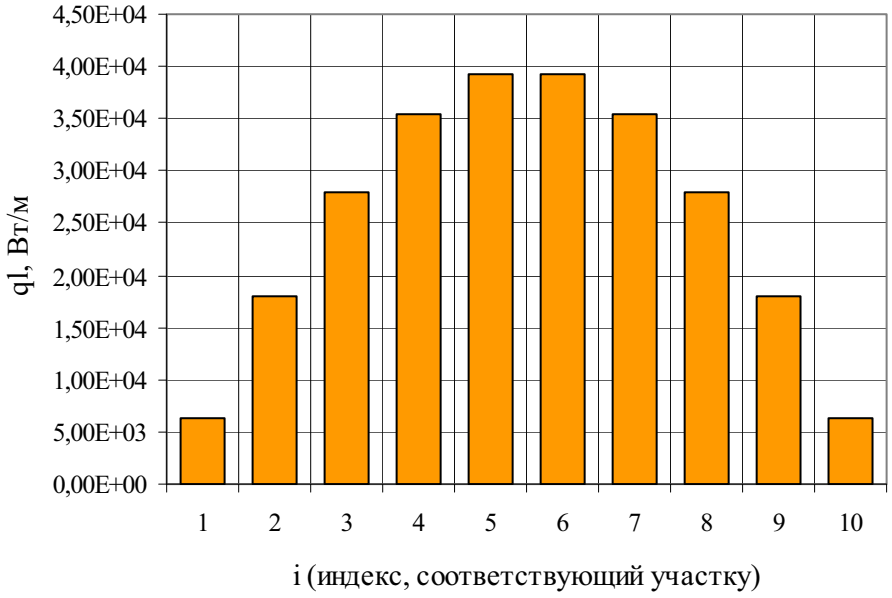


Рис. 2.2. Изменение линейной плотности тепловыделения по кассете

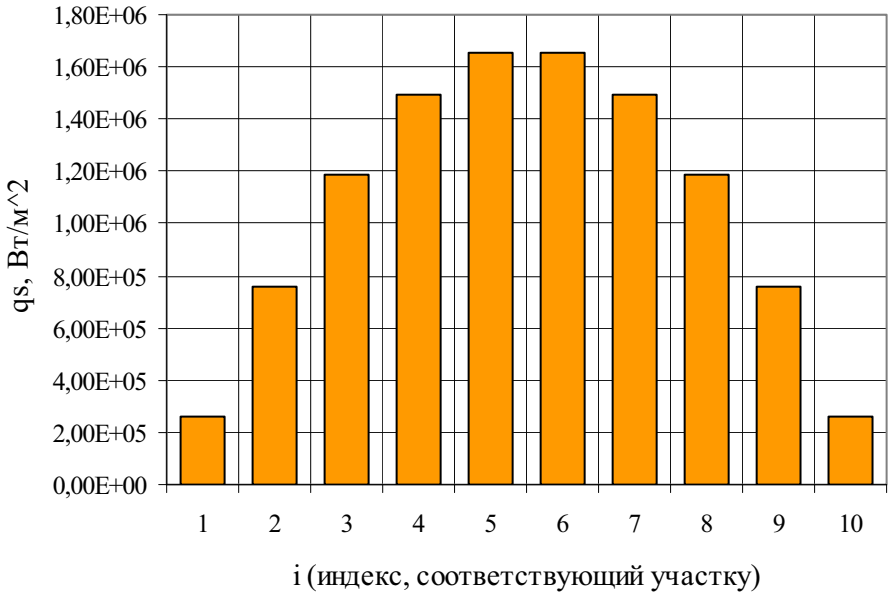


Рис. 2.3. Изменение поверхностного теплового потока по кассете

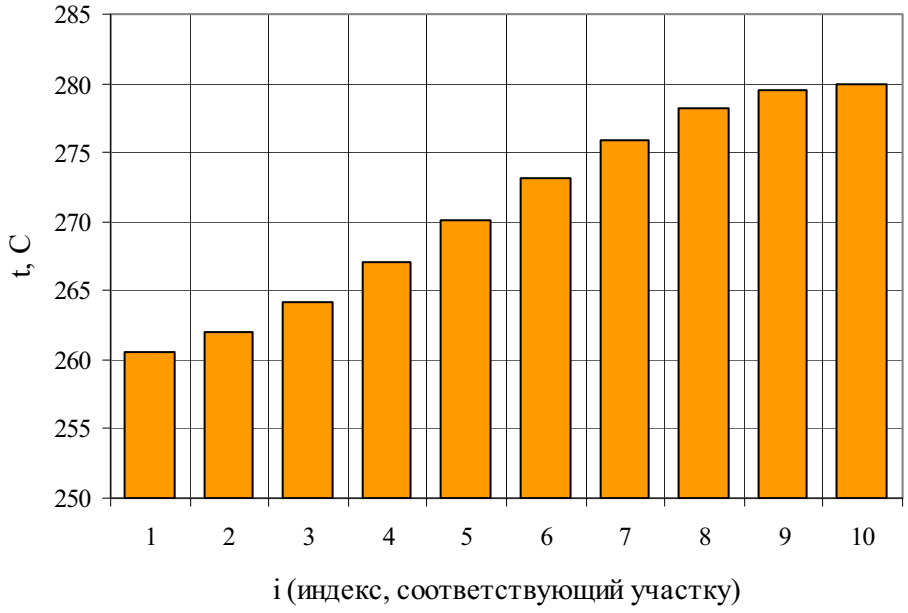


Рис. 2.4. Изменение температуры теплоносителя по кассете

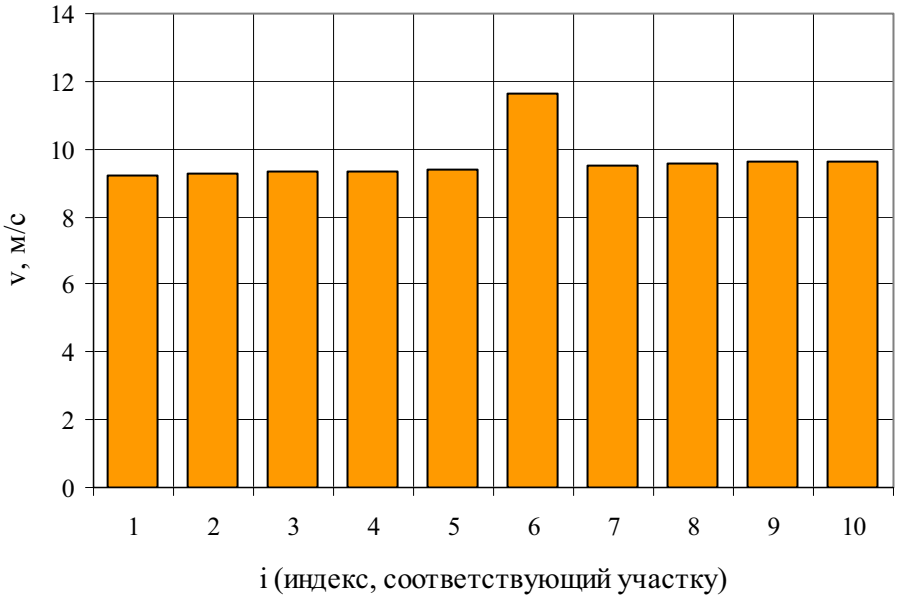


Рис. 2.5. Изменение скорости теплоносителя по кассете

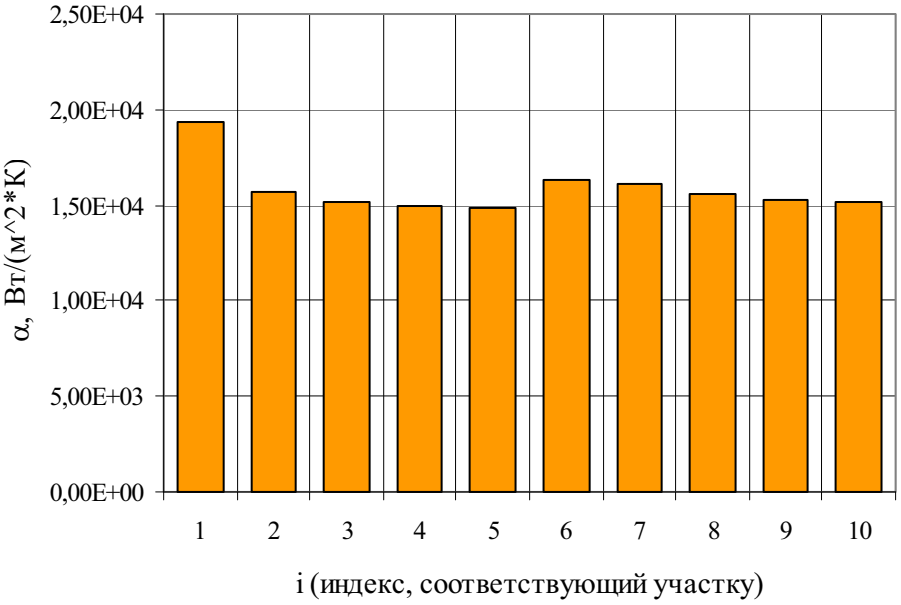


Рис. 2.6. Изменение коэффициента теплоотдачи по кассете

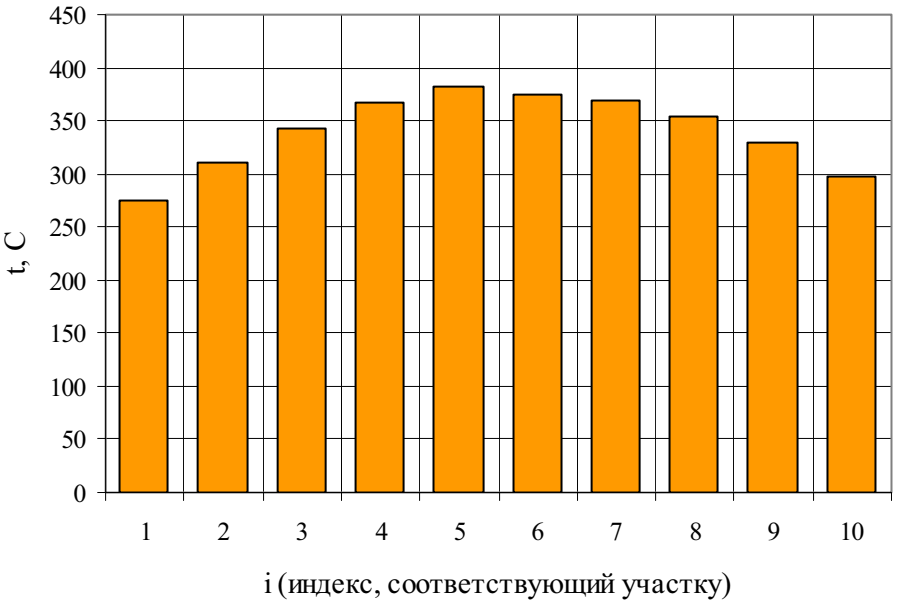


Рис. 2.7. Изменение температуры на поверхности твэл по кассете

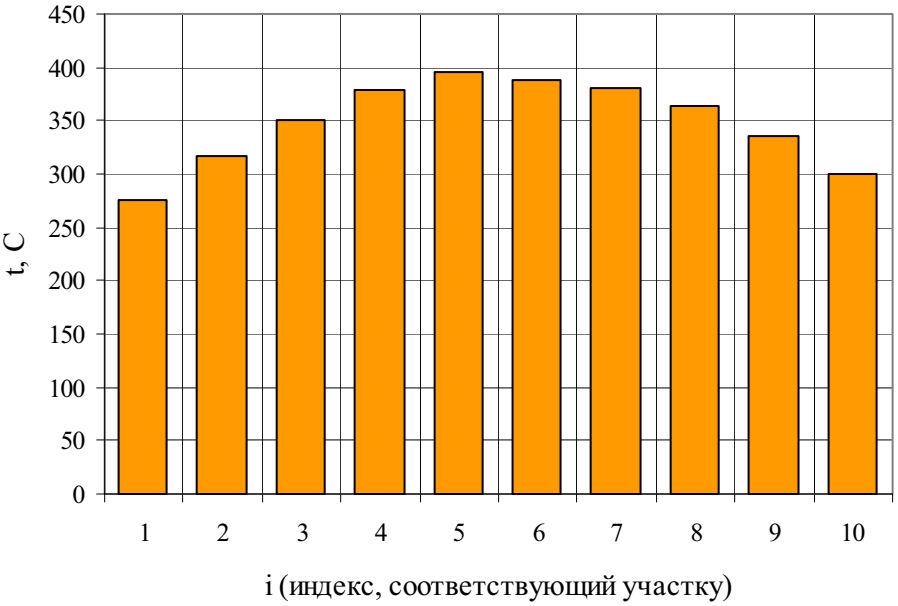


Рис. 2.8. Изменение температуры на поверхности ТТ по кассете

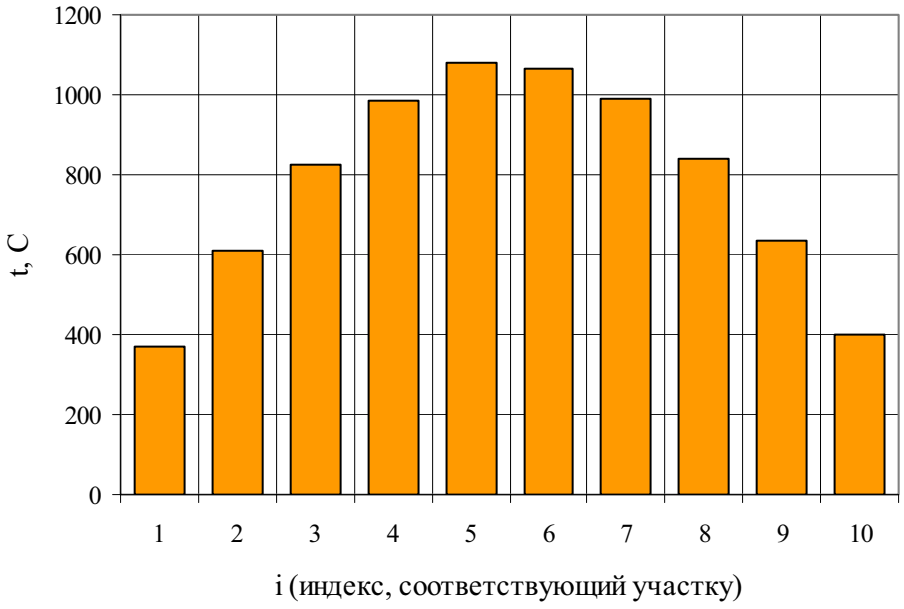


Рис. 2.9. Изменение температуры в центре ТТ по кассете

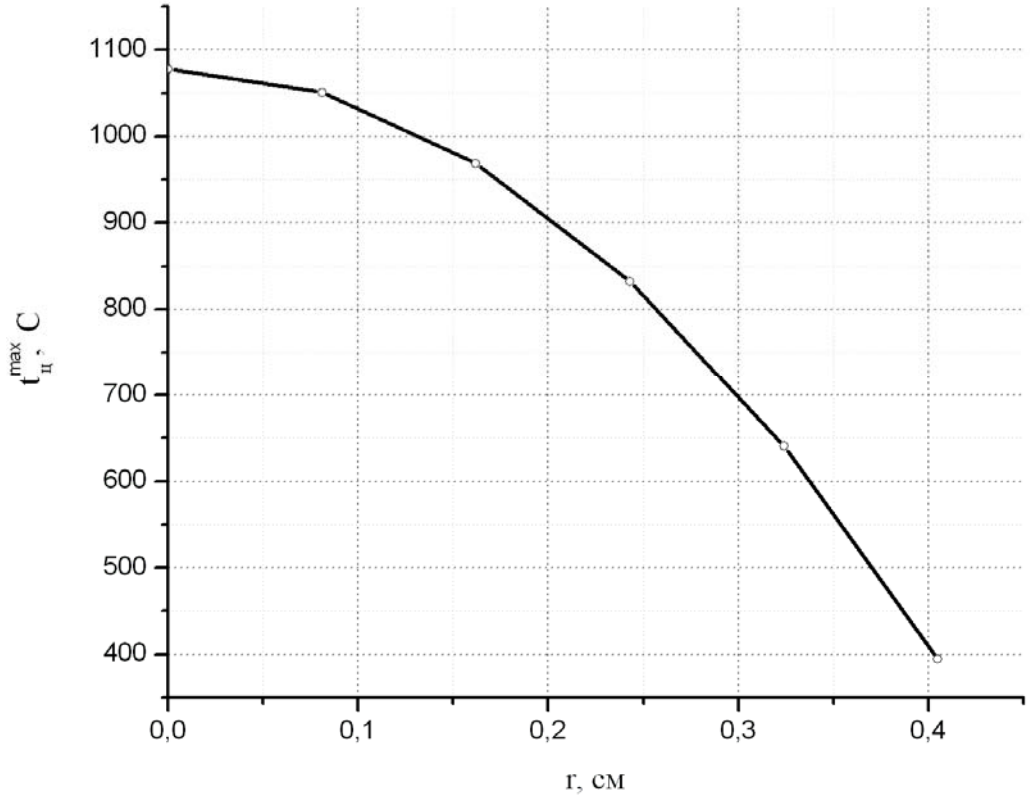


Рис. 2.10. Изменение температуры в ТТ по радиусу на наиболее энергонапряженном участке кассеты

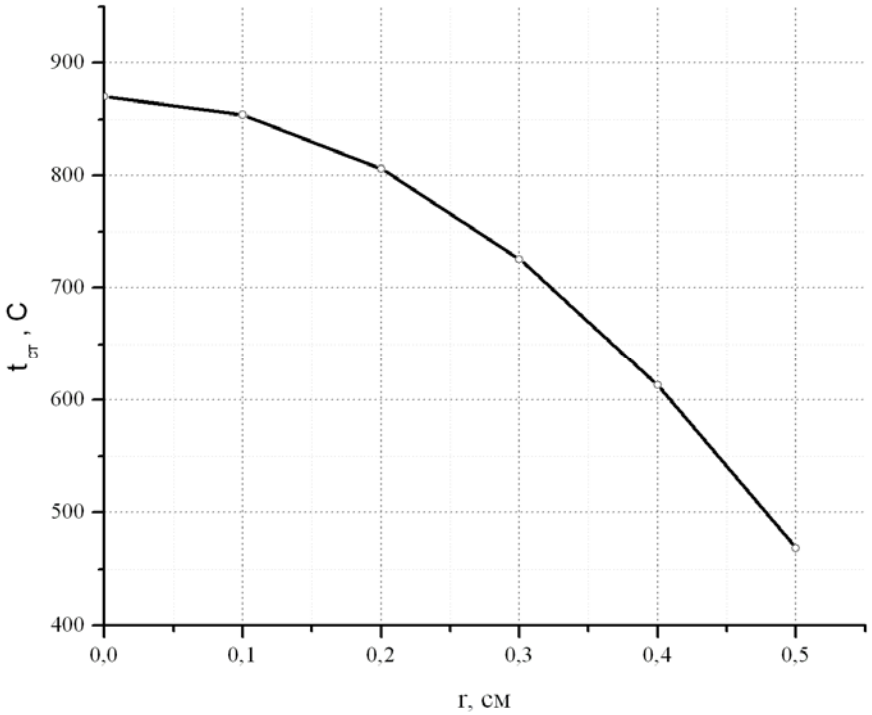


Рис. 2.11. Распределение температуры в центральном стержне СУЗ по радиусу

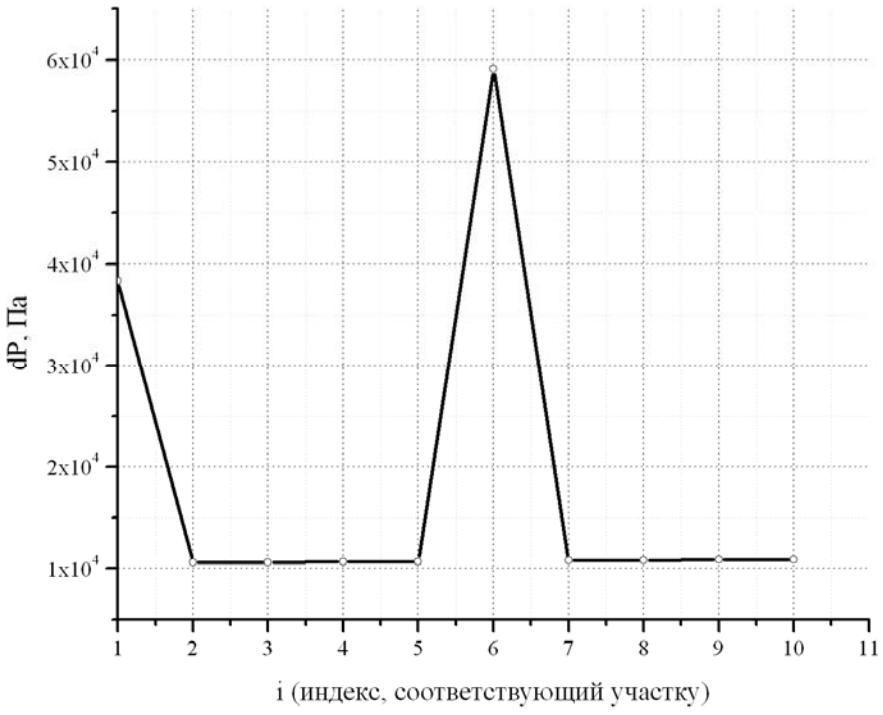


Рис. 2.12. Перепады давлений по кассете

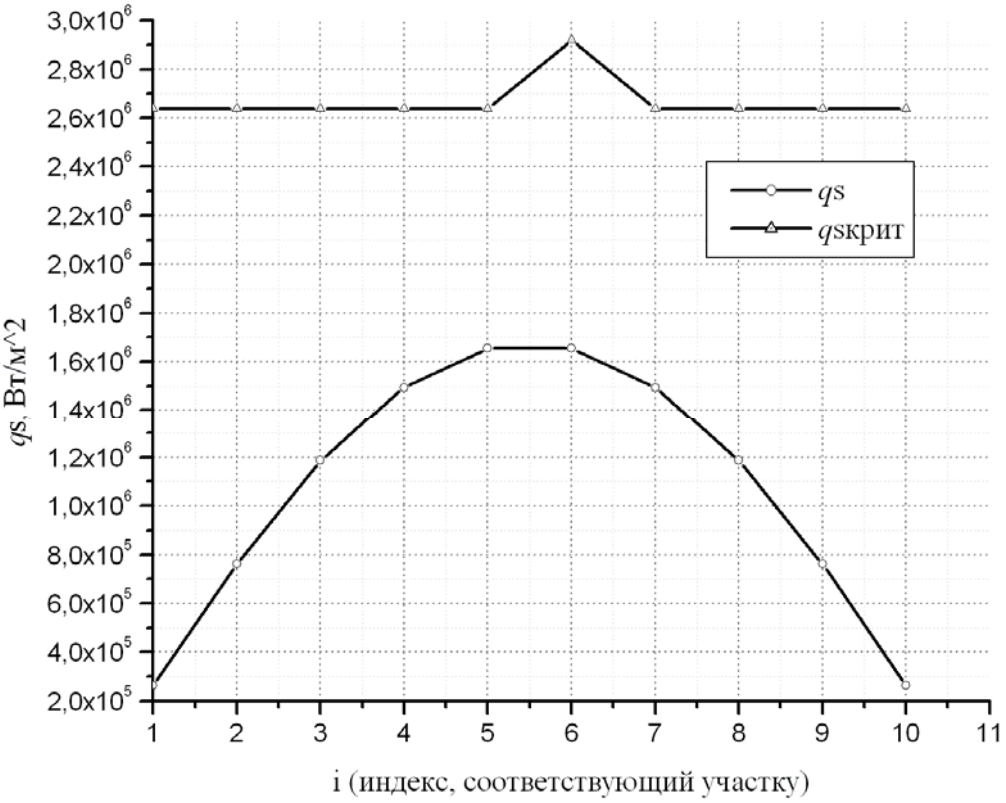
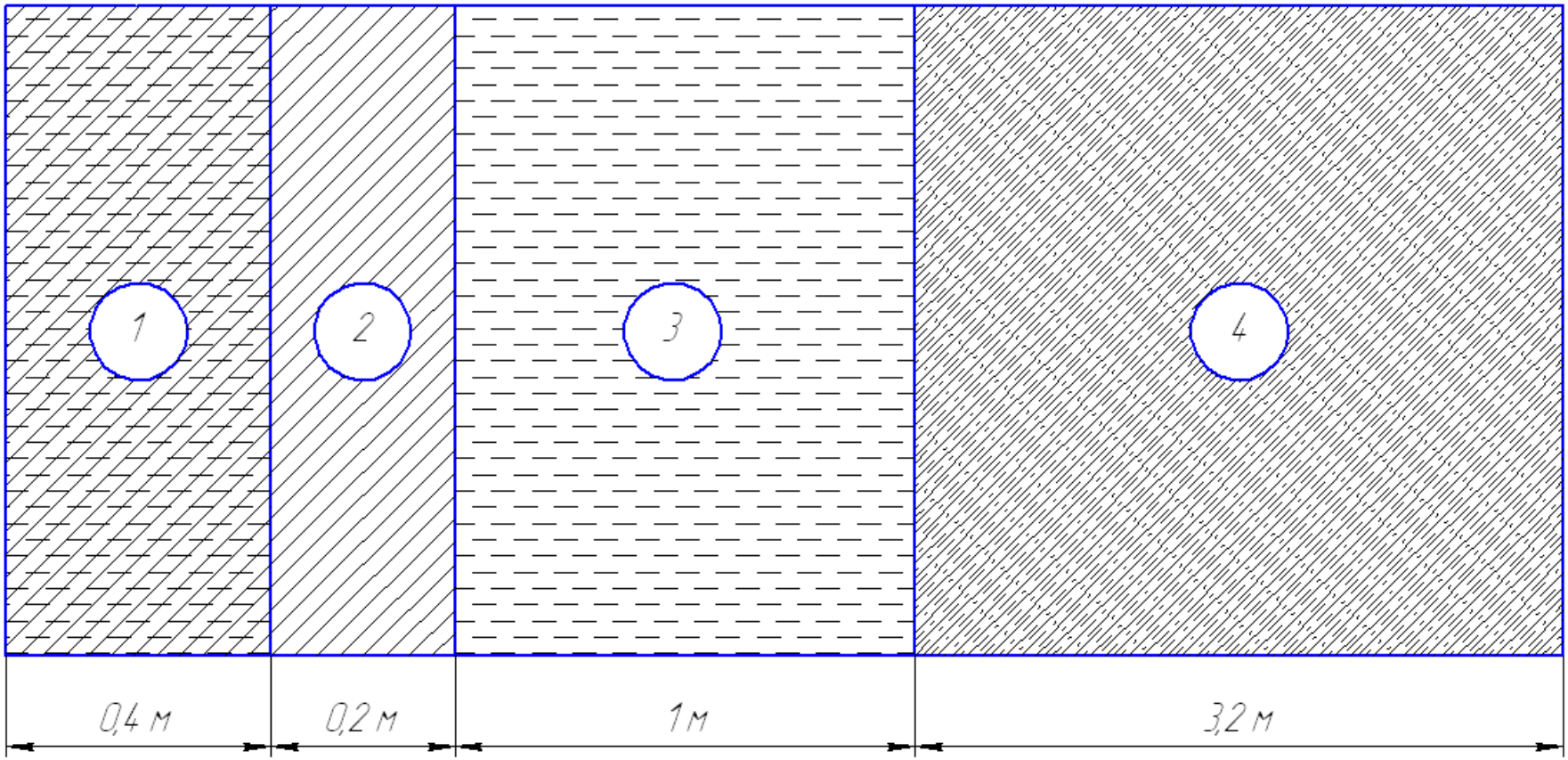


Рис. 2.13. Сравнение критических тепловых потоков $q_{si}^{\text{крит}}$ *со значениями* q_{si}



1 – ЖВЗ (отражатель); 2 – сталь (корпус реактора);
3 – вода (тепловая защита бетона); 4 – бетон (биологическая защита)

Рис. 3.1. Схема первичной защиты ядерного реактора

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Система образовательных стандартов
ПРОЕКТЫ КУРСОВЫЕ. Структура и правила оформления

System of educational standards.
Projects works. Structure and rules for presentation

1. Область применения

Настоящий стандарт*) распространяется на проекты курсовые (именуемые далее «работы»), выполняемые студентами Томского политехнического университета (ТПУ) и устанавливает общие требования к их структуре и правилам оформления. Стандарт входит в состав Системы образовательных стандартов ТПУ и подлежит применению всеми кафедрами и подразделениями ТПУ, обеспечивающими учебный процесс.

2. Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты**:**

ГОСТ Р 1.5–2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения»;

ГОСТ 2.104–2006 «Единая система конструкторской документации. Основные надписи»;

ГОСТ 2.105–95 «Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам».

*) – Действует с Изменением № 1, утвержденным приказом ректора ТПУ от 9.06.2007 г. № 3172 «Об изменении СТО ТПУ 2.5.01–2006» ***(Изм. № 1).***

ГОСТ 2.106–96 «Единая система конструкторской документации. Текстовые документы».

ГОСТ 2.301–68 «Единая система конструкторской документации. Форматы».

ГОСТ 2.316–68 «Единая система конструкторской документации. Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц».

ГОСТ 2.702–75 «Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем».

ГОСТ 2.709–89 «Единая система конструкторской документации. Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов, оборудования и участков цепей в электрических схемах».

ГОСТ 2.721–74 «Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения».

ГОСТ 3.1102–81 «Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов».

ГОСТ 3.1105–84 «Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения».

ГОСТ 3.1404–86 «Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов на технологические процессы и операции обработки резанием».

ГОСТ 3.1407–86 «Единая система технологической документации. Формы и требования к заполнению и оформлению документов на технологические процессы (операции), специализированные по методам сборки».

ГОСТ 7.1–2003 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание».

ГОСТ 7.9–95 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация».

ГОСТ 7.12–93 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Сокращения русский слов и словосочетаний в библиографическом описании произведений печати»

ГОСТ 7.32–2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно–исследовательской работе. Структура и правила оформления».

ГОСТ 7.82–2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов».

ГОСТ 8.417–2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин».

ГОСТ 19.101–77 «Единая система программной документации. Виды программ и программных документов».

ГОСТ 19.106–78 «Единая система программной документации. Требования к программным документам, выполненным печатным способом».

ГОСТ 19.401–78 «Единая система программной документации. Текст программы. Требования к содержанию и оформлению».

ГОСТ 19.402–78 Единая система программной документации. Описание программы».

ГОСТ 19.404–79 «Единая система программной документации. Пояснительная записка».

ГОСТ 19.502–78 «Единая система программной документации. Описание применения. Требования к содержанию и оформлению».

ГОСТ 19.701–90 «Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения».

ГОСТ 24.301–80 Система технической документации на АСУ. Общие требования к текстовым документам».

ГОСТ 24.302–80 «Система технической документации на АСУ. Общие требования к выполнения схем».

ГОСТ 24.303–80 «Система технической документации на АСУ. Обозначения условные графические технических средств».

ГОСТ 28388–89 «Система обработки информации. Документы на магнитных носителях данных. Порядок выполнения и обращения».

При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов по указателю «Национальные стандарты», составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3. Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1. Курсовой проект (КП): учебная работа, содержащая результаты поставленной задачи по отдельной учебной дисциплине или группе учебных дисциплин, оформленная в виде конструкторских, технологических, программных и других проектных документов. КП является самостоятельной работой студента, выполняемой в процессе обучения для решения следующих задач:

– закрепления и более глубокого усвоения теоретических знаний и практических навыков в применении методов для решения конкретных задач;

– приобретения навыков и освоения методов анализа и синтеза, выбора и обоснования при проектировании заданных объектов;

– развития самостоятельности при выборе методов достижения цели и творческой инициативы при решении конкретных задач;

– подготовки к выполнению ВКР.

3.2. Текстовый документ (ТД): научно-технический документ, содержащий систематизированные данные о выполненной студентом про-

ектной, научной или исследовательской работе, описывающий процесс ее выполнения и полученные результаты в виде текста и необходимых иллюстраций.

3.3. Техническое задание (ТЗ): документ, определяющий исходные требования, предъявляемые к объекту разработки, а также объем, форму и сроки представления результатов работы по технической специальности, направлению или дисциплине.

4. Структура студенческих работ

4.1. Работа в общем случае должна содержать:

– текстовый документ (ТД);

– графический материал.

Необходимость представления графического материала определяется заданием и условиями защиты работы.

Работа может быть полностью или частично представлена на технических носителях данных ЭВМ (ГОСТ 28388–89), если это установлено заданием (ТЗ).

4.2. ТД должен включать структурные элементы в указанной ниже последовательности:

– титульный лист;

– задание (ТЗ);

– реферат;

– содержание;

– определения;

– обозначения и сокращения;

– введение;

– основную часть;

– заключение;

– список использованных источников;

– приложения.

Структурные элементы «Определения», «Обозначения и сокращения» включаются по мере необходимости и могут быть объединены.

После приложений в ТД могут быть помещены самостоятельные конструкторские, технологические, программные и другие проектные документы, выполненные в ходе проектирования согласно заданию (ТЗ).

4.3. К графическому материалу следует относить:

– демонстрационные листы (плакаты);

– чертежи и схемы.

Демонстрационные листы служат для наглядного представления материала работы при ее публичной защите.

Чертежи и схемы – в виде законченных конструкторских самостоятельных документов или рисунков, в зависимости от характера работы, могут представляться как на отдельных листах, используемых при публичной защите, так и в составе ТД.

5. Требования к структурным элементам текстового документа

5.1. Общие требования к ТД

5.1.1. ТД должен в краткой и четкой форме раскрывать творческий замысел работы, постановку задачи, выбор и обоснование принципиальных решений, содержать описание методов исследования анализа, расчетов, описание проведенных экспериментов, анализ результатов экспериментов и выводы по ним. Текст ТД должен сопровождаться иллюстрациями (графиками, эскизами, диаграммами, схемами и т. п.).

5.1.2. Оформление ТД проводится с учетом выполнения требований:

– для КП – по ГОСТ 2.105;

5.1.3. ТД выполняется на русском языке. Допускается выполнение ТД на иностранном языке, если это установлено заданием (ТЗ).

5.1.4. Каждый структурный элемент ТД следует начинать с нового листа. Название структурного элемента в виде заголовка записывают строчными буквами, начиная с первой прописной, симметрично тексту ТД.

5.1.5. По рекомендации кафедры реферат, либо заключение могут быть переведены на иностранный язык.

5.1.7. ТД должен быть сшит и иметь обложку. В КП обложку рекомендуется выполнять на плотной бумаге, совмещая ее с титульным листом.

5.1.8. Если ТД полностью выполнен на технических носителях данных ЭВМ, в обложку (папку) должны быть помещены:

– титульный лист;

– реферат на русском языке, оформленный согласно 5.4, при этом в тексте реферата дополнительно приводятся сведения о виде носителя ТД, его размещении в обложке (папке), а также информация, необходимая и достаточная для просмотра всех материалов работы на экране ЭВМ;

– задание (ТЗ), утвержденное заведующим кафедрой;

– технический носитель данных, причем размещение носителя должно исключать его случайное выпадение из папки (обложки).

Титульный лист, реферат и ТЗ должны быть выполнены в соответствии с п. 6.1.1.

5.2. Титульный лист

Форма титульных листов и образцы их заполнения приведены в приложении.

Строка «Обозначение» заполняется только для инженерных проектов. Правила присвоения обозначения документам приведены в разделе 8.

5.3. Задание (ТЗ)

5.3.1. Проект, работа, диссертация должны выполняться на основе индивидуального задания, содержащего требуемые для решения поставленных задач исходные данные, обеспечивающие возможность реализации накопленных знаний в соответствии с уровнем профессиональной подготовки каждого студента.

5.3.2. Руководитель работы совместно со студентом формирует задание, соответствующее тематике КП, которое студент оформляет в соответствии с требованиями данного стандарта, по форме, приведенной в приложении Г. Формулировка темы для ВКР в задании должна точно соответствовать ее формулировке в приказе по университету.

5.3.3. При заполнении формы, приведенной в приложением Б, для технических дисциплин следует указать в разделе 3 ТЗ основные технические требования, предъявляемые к изделию, процессу и т. п.

5.3.4. Форма задания заполняется рукописным или машинописным способом.

5.4. Реферат

5.4.1. Реферат размещается на отдельном листе (странице). Рекомендуемый средний объем реферата 850 печатных знака. Объем реферата не должен превышать одной страницы.

Заголовком служит слово «Реферат» (для реферата на иностранном языке – соответствующий иностранный термин).

5.4.2. Реферат должен содержать:

– сведения об объеме ТД, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве частей ТД, использованных источников, листов графического материала;

– перечень ключевых слов;

– текст реферата.

5.4.2.1. Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста ТД, которые в наибольшей мере характеризуют его содержание и обеспечивают возможность информационного поиска. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и записываются строчными буквами в строку через запятые.

5.4.2.2. Текст реферата должен отражать оформленные в виде структурных частей:

– объект исследования или разработки;

– цель работы;

– метод или методологию проведения работы (исследования) и аппаратуру;

– полученные результаты и их новизну;

– основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики;

– степень внедрения;

– рекомендации или итоги внедрения результатов работы;

– область применения;

– экономическую эффективность или значимость работы;

– прогнозные предположения о развитии объекта исследования (разработки);

– дополнительные сведения (особенности выполнения и оформления работы и т. п.).

Если ТД не содержит сведений по какой-либо из перечисленных структурных частей реферата, то в тексте реферата она опускается, при этом последовательность изложения сохраняется.

5.4.3. Изложение материала в реферате должно быть кратким и точным и соответствовать положениям ГОСТ 7.9. Сложных грамматических оборотов следует избегать.

5.5. Содержание

5.5.1. Содержание включает введение, заголовки всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование), заключение, список использованных источников и наименования приложений с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы. При наличии самостоятельных конструкторских, технологических, программных и иных документов, помещаемых в ТД, их перечисляют в содержании с указанием обозначений и наименований.

Материалы, представляемые на технических носителях данных ЭВМ, должны быть перечислены в содержании с указанием вида носителя, обозначения и наименования документов, имен и форматов соответствующих файлов, а также места расположения носителя в ТД.

В конце содержания перечисляют графический материал, представляемый к публичной защите, с указанием «На отдельных листах».

5.5.2. Оформление содержания – в соответствии с приложением В.

5.6. Определения

5.6.1. Структурный элемент «Определения» содержит определения, необходимые для уточнения или уставновления терминов, используемых в работе.

5.6.2. Перечень определений начинают со слов; «В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями…».

5.6.3. Определение должно быть оптимально кратким и состоять из одного предложения. При этом дополнительные пояснения приводят в примечаниях.

5.6.4. Термин записывают со строчной буквы, а определение с прописной. Термин отделяют от определения двоеточием.

5.7. Обозначения и сокращения

5.7.1. Если в ТД необходимо использовать значительное количество (более пяти) обозначений и(или) сокращений, то оформляется структурный элемент «Обозначения и сокращения», содержащий перечень обозначений и сокращений, применяемых для данной работы (проекта). Запись обозначений и сокращений в этом элементе приводят в порядке их появления в тексте с необходимой расшифровкой и пояснениями. При этом:

– сокращения в виде аббревиатур приводят после термина и отделяют от него точкой с запятой;

– сокращения в виде краткой формы термина приводят после термина в скобках и выделяют полужирным шрифтом;

– условные обозначения приводят после термина и выделяют полужирным шрифтом, при этом после условных обозначений величин приводят обозначения единиц величин, которые отделяют запятой и выделяют полужирным шрифтом.

5.7.2. Допускается определения, обозначения и сокращения приводить в одном структурном элементе «Определения, обозначения и сокращения».

5.7.3. В тексте документа допускается приводить без расшифровки общепринятые сокращения, установленные в национальных стандартах и правилами русской орфографии: ЭВМ, НИИ, с. – страница, т. е. – то есть, т. д. – так далее; т. п. – тому подобное; и др. – и другие; в т. ч. – в том числе; пр. – прочие; т. к. – так как; с. – страница; г. – год; гг. – годы; мин. – минимальный; макс. – максимальный; шт. – штуки; св. – свыше; см. – смотри; включ. – включительно и др.

5.7.4. В ТД при многократном упоминании устойчивых словосочетаний могут быть дополнительно установлены сокращения, применяемые только в данном тексте. При этом полное название следует приводить при его первом упоминании в тексте, а после полного названия в скобках – сокращенное название или аббревиатуру, например: «…цилиндрические топливные таблетки (далее – таблетки) …»; «…ядерная паропроизводящая установка (ЯППУ)…»; «…тепловыделяющая сборка (ТВС) …». При последующем упоминании употребляют сокращенное название или аббревиатуру.

5.7.5. В тексте документа не допускается:

– применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами, а также в данном документе;

– сокращать обозначения единиц физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением единиц физических величин в головках и боковиках таблиц и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы и рисунки.

5.7.6. В тексте следует избегать необоснованных (излишних) сокращений, которые могут затруднить пользование данным документом.

5.7.7. Сокращение русских слов и словосочетаний – по ГОСТ 7.12.

5.7.8. Перечень допускаемых сокращений, используемых в текстовой конструкторской документации, приведен в ГОСТ 2.316.

5.8. Введение

5.8.1. В элементе «Введение» указывают цель работы, область применения разрабатываемой проблемы, ее научное, техническое и практическое значение, экономическую целесообразность.

5.8.2. Во введении следует:

– раскрыть актуальность вопросов темы;

– охарактеризовать проблему, к которой относится тема, изложить историю вопроса, дать оценку современного состояния теории и практики;

– привести характеристику отрасли промышленности, предприятия – базы дипломной практики;

– изложить задачи в области разработки проблемы, т. е. сформулировать задачи темы работы;

– перечислить методы и средства, с помощью которых будут решаться поставленные задачи;

– кратко изложить ожидаемые результаты, в том числе технико-экономическую целесообразность выполнения данной темы, либо экономическую эффективность.

5.8.3. Рекомендуемый объем введения устанавливается выпускающей кафедрой, исходя из специфики области проводимых работ.

5.9. Основная часть

5.9.1. Содержание основной части работы должно отвечать заданию (ТЗ) и требованиям, изложенным в методических указаниях соответствующей кафедры.

5.9.2. Наименования разделов основной части отражают выполнение задания. Содержание и объем основной части студент и руководитель формируют совместно, исходя из требований методических указаний профилирующей кафедры и в соответствии с ГОСТ 7.32.

5.10. Заключение

Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решения поставленных задач, рекомендации по конкретному использованию результатов работы, ее экономическую, научную, социальную значимость.

5.11. Список использованных источников (литературы)

5.11.1. В список включают все источники, на которые имеются ссылки в ТД. Источники в списке располагают и нумеруют в порядке их упоминания в тексте ТД арабскими цифрами без точки.

5.11.2. Сведения об источниках приводят в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1 и ГОСТ 7.82. Примеры библиографических описаний источников приведены в приложении Ж.

5.11.3. Различают две схемы оформления сведений об источнике в зависимости от характера ссылки на него в ТД. При ссылке на весь документ применяется схема библиографического описания издания (источника) в целом. А при ссылке на часть документа (источника), например, статьи из журнала или доклада из сборника конференции, применяется схема библиографического описания части документа.

5.11.4. Схема библиографического описания издания (источника) в целом включает: область названия, область издания и область количественной характеристики, разделенных друг от друга знаком «**.**–».Внутри каждой области могут использоваться другие разделительные знаки: «**,**», «**:**», «**.**», «/», «**;**». В области названия включаются сведения об авторе и название издания. В области издания приводятся: город, издательство и год издания. В области количественной характеристики: общее количество страниц. Схема построения описания издания в целом представляется в виде:

Фамилия И.О. основного автора. Основное название книги / сведения о редакторе (при наличии). – Город: Издательство, год издания. – Количество страниц.

5.11.5. Схема библиографического описания части документа включает: сведения о части документа и сведения о документе в целом (чаще всего это сведения о журнале, содержащем описываемую статью), разделенные знаком «//». В сведениях о части документа приводится фамилия, инициалы автора и название этой статьи. В сведениях о документе в целом приводят: название журнала, год выпуска журнала, номер журнала и номера страниц, на которых находятся начало и конец статьи. В целом схема построения описания части издания представляется в виде:

Фамилия И.О. автора. Названии статьи // Название журнала. – Год выпуска. – № журнала. – С. 7–11.

5.11.6. Сведения об иностранных источниках приводятся на иностранном языке в соответствии с приложением Г.

5.12. Приложения

5.12.1. В приложениях выносятся: графический материал большого объема и/или формата, таблицы большого формата, методы расчетов, описания аппаратуры и приборов, описания алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ и т. д. В них рекомендуется включать материалы иллюстрационного и вспомогательного характера. В приложения могут быть помещены:

– таблицы и рисунки большого формата;

– дополнительные расчеты;

– распечатки с ЭВМ;

– самостоятельные материалы и документы конструкторского, технологического и прикладного характера;

– промежуточные математические доказательства, формулы и расчеты;

– иллюстрации вспомогательного характера.

5.12.2. Приложения размещают, как продолжение ТД, на последующих страницах и включают в общую с ТД сквозную нумерацию страниц. Приложения, содержащие дополнительные текстовые документы, следует помещать в приложение в последнюю очередь.

5.12.3. По статусу приложения могут быть обязательными и информационными. Информационные приложения могут быть рекомендуемого или справочного характера.

5.12.4. Приложения обозначают в порядке ссылок на них в тексте, прописными буквами русского алфавита, начиная с А (за исключением букв Ё, З, И, О, Ч, Ь, Ы, Ъ), которые приводят после слова «Приложение». Допускается обозначение приложений буквами латинского алфавита, за исключением букв I и O. В случае полного использования букв русского и латинского алфавитов допускается обозначать приложения арабскими цифрами.

5.12.5. При наличии только одного приложения, оно обозначается «Приложение А».

5.12.6. Каждое приложение должно начинаться с нового листа и иметь тематический заголовок и обозначение. Наверху посередине листа (страницы) печатают (пишут) строчными буквами с первой прописной слово «Приложение» и его буквенное обозначение. Под ним в скобках указывают степень необходимости приложения, например «(рекомендуемое)», «(справочное)», «(обязательное)».

Ниже приводят в виде отдельной строки заголовок, который располагают симметрично относительно текста, печатают строчными буквами с первой прописной и выделяют полужирным шрифтом.

5.12.7. Текст каждого приложения при необходимости может быть разделен на разделы, подразделы, пункты, подпункты, которые нумеруют в пределах каждого приложения. Перед номером ставится буквенное обозначение этого приложения, отделенное точкой.

5.12.8. Рисунки, таблицы, формулы, помещаемые в приложении, нумеруют арабскими цифрами в пределах каждого приложения, например: «…рисунок Б.5…».

5.12.9. Приложения, как правило, выполняют на листах формата А4. Допускается оформлять приложения на листах формата А3, А4х3, А4х4, А2 и А1 по ГОСТ 2.301.

5.12.10. В тексте КП на все приложения должны быть даны ссылки, оформленные по 6.8.

5.12.11. Все приложения должны быть перечислены в содержании КП с указанием их буквенных обозначений и заголовков.

5.12.12. Если в приложении размещается материал, выпускаемый в виде самостоятельного документа, то его оформляют по правилам, установленным для данного вида документа.

5.13. Раздел КП, выполненный на иностранном языке

5.13.1. Раздел, выполненный на иностранном языке, в дальнейшем – перевод, в структуре текстового документа КП размещается в приложении.

5.13.2. Приложение, содержащее перевод, является обязательным для студентов очной формы, обучающимся по образовательным программам подготовки дипломированных специалистов на факультетах и в институтах ТПУ (кроме ИЯК).

5.13.3. Для перевода используется раздел основной части КП, содержащий информационно-аналитический обзор, в котором описательная часть доминирует над информацией, представляемой в виде рисунков, таблиц, зависимостей и т. п., и позволяет выпускнику продемонстрировать языковые аспекты письменной речи. Его проработка основывается на широком спектре информационных источников: учебники, методические пособия, официальные нормативные документы, патенты, периодические издания, технологические бюллетени, статистические сборники, Интернет публикации зарубежных компаний и др.

5.13.4. Перевод не является дословным переводом раздела КП, выполняемого на русском языке, но отражает его полное содержание.

5.13.5. Объем перевода составляет не менее 20 % от объема основной части КП.

5.13.6. В списке использованных источников приводится не менее 20 % ссылок на иностранные информационные ресурсы от общего количества указанных в КП ссылок.

5.13.7. Первым листом перевода является титульный лист, содержащий в приведенной последовательности следующие данные:

5.13.7.1. Наверху посередине листа (страницы) на русском языке печатают (пишут) строчными буквами с первой прописной слово «Приложение», и его буквенное обозначение.

5.13.7.2. Под ним в скобках приводят на русском языке степень необходимости приложения – (обязательное).

5.13.7.3. Заголовок раздела приводится посередине листа на иностранном языке строчными буквами с первой прописной и выделяют полужирным шрифтом.

5.13.7.4. Ниже приводится номер переведенного раздела. Слово «раздел» выполняется на иностранном языке.

5.13.7.5. Сведения о студенте и консультантах приводятся в соответствии с формой титульного листа, приведенной в приложении М.

5.13.7.6. При заполнении титульного листа подстрочные надписи, приведенные в форме титульного листа, убираются.

6. Требования к оформлению ТД

6.1. Общие положения

6.1.1. ТД должен быть выполнен на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с одной стороны листа с применением печатающих или графических устройств вывода ЭВМ – через 1,5 интервала, высота букв и цифр не менее 1,8 мм, цвет – черный. Рекомендуется использовать гарнитуру шрифта Times New Roman-14, допускается Arial-12. При печати текстового материала следует использовать двухстороннее выравнивание.

6.1.2. Размеры полей: левое – не менее 30 мм, правое – не менее 10 мм, верхнее и нижнее – не менее 20 мм.

6.1.3. Абзацный отступ выполняется одинаковым по всему тексту документа и равен пяти знакам (15–17 мм).

6.1.4. Иллюстрации, таблицы и распечатки с ЭВМ допускается выполнять на листах формата А3, при этом они должны быть сложены на формат А4.

6.1.5. Буквы греческого и иных алфавитов, формулы, отдельные условные знаки допускается вписывать черными чернилами, пастой или тушью. При этом плотность вписанного текста должна быть приближена к плотности остального текста. Если чертежи, схемы, диаграммы, рисунки и/или другой графический материал невозможно выполнить машинным способом, для него используют черную тушь или пасту.

6.1.6. Опечатки, описки, графические неточности, обнаруженные в тексте ТД, допускается исправлять аккуратным заклеиванием или закрашивание белой краской и нанесением на том же месте и тем же спо-

собом исправленного текста. Повреждение листов ТД, помарки и следы не полностью удаленного текста не допускаются.

6.2. Требования к изложению ТД

6.2.1. Текст документа должен быть кратким, четким и не допускать различных толкований.

6.2.1.1. При изложении обязательных требований в тексте должны применяться слова: «должен», «следует», «необходимо», «требуется, чтобы», «разрешается только», «не допускается», «запрещается», «не следует». При изложении других положений следует применять слова – «могут быть», «как правило», «при необходимости», «может быть», «в случае» и т. д. При этом допускается использовать повествовательную форму изложения текста документа, например «применяют», «указывают» и т. п.

6.2.1.2. Если в документе приводятся поясняющие надписи, наносимые непосредственно на изготовляемое изделие (например, на планки, таблички к элементам управления и т. п.), их выделяют шрифтом (без кавычек), например ВКЛ., ОТКЛ., или кавычками, если надпись состоит из цифр и (или) знаков.

6.2.1.3. Наименования команд, режимов, сигналов и т. п. в тексте следует выделять кавычками, например, «Сигнал +27 включено».

6.2.2. В тексте ТД не допускается:

– применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;

– применять произвольные словообразования;

– применять индексы стандартов (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ и т. п.), технических условий (ТУ) и других документов без регистрационного номера.

– использовать в тексте математические знаки и знак ∅ (диаметр), а также знаки N (номер) и % (процент) без числовых значений. Следует писать: «температура минус 20 °С»; «значение параметра больше или равно 35» (но не «температура -20 °С» или «значение параметра ≥ 36»); «стержень диаметром 25 мм» (а не «стержень ∅25»); «изделие № 325», «номер опыта» (но не «№ опыта»); «влажность 98 %», «процент выхода» (но не «% выхода»);

– применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами, а также в данном документе;

– сокращать обозначения единиц физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением единиц физических величин в головках и боковиках таблиц и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы и рисунки.

6.2.2.1. Наряду с единицами СИ, при необходимости, в скобках указывают единицы ранее применявшихся систем, разрешенных к применению. Применение в одном документе разных систем обозначения физических величин не допускается.

6.2.2.2. В тексте документа числовые значения величин с обозначением единиц физических величин и единиц счета следует писать цифрами, а числа без обозначения единиц физических величин и единиц счета от единицы до девяти – словами.

Примеры

1. Провести испытания пяти труб, каждая длиной 5 м.

2. Отобрать 15 труб для испытаний на давление.

6.2.2.3. Единица физической величины одного и того же параметра в пределах одного документа должна быть постоянной. Если в тексте приводится ряд числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то ее указывают только после последнего числового значения, например 1,50; 1,75; 2,00 м.

6.2.2.4. Если в тексте документа приводят диапазон числовых значений физической величины, выраженных в одной и той же единице физической величины, то обозначение единицы физической величины указывается после последнего числового значения диапазона.

Примеры:

1. От 1 до 5 мм.

2. От 10 до 100 кг.

3. От 10 до минус 40 °С.

Недопустимо отделять единицу физической величины от числового значения (переносить их на разные строки или страницы).

6.2.2.5. Приводя наибольшие или наименьшие значения величин следует применять словосочетание «должно быть не более (не менее)».

Приводя допустимые значения отклонений от указанных норм, требований следует применять словосочетание «не должно быть более (менее)».

Пример

Массовая доля углекислого натрия в технической кальцинированной соде должна быть не менее 99,4 %.

6.2.2.6. Числовые значения величин в тексте следует указывать со степенью точности, которая необходима для обеспечения требуемых свойств изделия, при этом в ряду величин осуществляется выравнивание числа знаков после запятой.

Округление числовых значений величин до первого, второго, третьего и т. д. десятичного знака для различных типоразмеров, марок и т. п. изделий одного наименования должно быть одинаковым. Например, если градация толщины стальной горячекатаной ленты 0,25 мм, то весь ряд толщин ленты должен быть указан с таким же количеством десятичных знаков: 1,50; 1,75; 2,00 мм.

6.2.2.7. Дробные числа необходимо приводить в виде десятичных дробей, за исключением размеров в дюймах, которые следует записывать 1/4"; 1/2". При невозможности (нецелесообразности) выразить числовое значение в виде десятичной дроби, допускается записывать в виде простой дроби в одну строчку через косую черту, например, 5/32.

6.2.3. Условные буквенные обозначения, изображения или знаки должны соответствовать принятым в действующем законодательстве и национальных стандартах. В тексте ТД перед обозначением параметра дают его наименование.

Пример

Температура окружающей среды Т.

6.2.4. В ТД должны применяться термины, обозначения и определения, установленные стандартами по соответствующему направлению науки, техники и технологии, а при их отсутствии – общепринятые в научно-технической литературе. Например, в ТД следует применять, стандартизованные в соответствии с ГОСТ 8.417, единицы физических величин, а также их наименования и обозначения.

6.3. Деление текста

6.3.1. Весь ТД состоит из структурных элементов, приведенных в 4.2. Каждый структурный элемент имеет свои особенности оформления, указанные в соответствующих пунктах данного стандарта.

6.3.2. Текст основной части документа разделяют на разделы, подразделы, пункты. Пункты, при необходимости, могут делиться на подпункты. При делении текста на пункты и подпункты необходимо, чтобы каждый пункт содержал законченную информацию.

6.3.3. Разделы, подразделы, пункты и подпункты нумеруют арабскими цифрами и записывают с абзацного отступа.

6.3.4. Разделы нумеруют сквозной нумерацией в пределах текста основной части. Подразделы нумеруют в пределах каждого раздела. Номер подраздела включает номер раздела и порядковый номер подраздела, разделенные точкой.

Если текст не имеет подразделов, то нумерация пунктов должна быть в пределах каждого раздела, и номер пункта должен состоять из номеров раздела и пункта, разделенных точкой.

Примеры

1. Типы и основные размеры (номер и заголовок первого раздела):

1.1.
1.2. } *Нумерация пунктов первого раздела;*
1.3.

2. Технические требования (номер и заголовок второго раздела):

2.1.
2.2. } *Нумерация пунктов второго раздела.*
2.3.

Пункты должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела или подраздела. Номер подпункта включает номер раздела, подраздела, пункта и порядковый номер подпункта, разделенные точкой.

Примеры

3. Методы испытаний (номер и заголовок третьего раздела);

3.1. Аппараты, материалы и реактивы (номер и заголовок первого подраздела третьего раздела);

3.1.1.
3.1.2. } *(Нумерация пунктов первого подраздела третьего раздела);*

3.1.2.1.
3.1.2.2. } *(Нумерация подпунктов второго пункта первого подраздела третьего раздела).*

Точка в конце номеров разделов, подразделов, пунктов, подпунктов не ставится.

Разделы и подразделы могут состоять из одного или нескольких пунктов. Если раздел состоит из одного подраздела, то подраздел не нумеруется. Отдельные разделы могут не иметь подразделов и состоять непосредственно из пунктов. Если раздел или подраздел имеет только один пункт или пункт имеет только один подпункт, то нумеровать его не следует.

6.3.5. Внутри пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления.

Перед каждым перечислением следует ставить дефис или, при необходимости ссылки в тексте на одно из перечислений, строчную букву (за исключением ё, з, о, ч, ь, й, ы, ъ), после которой ставится скобка. Для дальнейшей детализации перечислений используются арабские цифры со скобкой, причем запись производится с абзацного отступа.

Пример

а) _____;

б) _____:

1) _____;

2) _____;

*в)*_____ .

6.3.6. Каждое перечисление записывают с абзацного отступа

6.4. Заголовки

6.4.1. Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов.

6.4.2. Заголовки разделов, подразделов и пунктов следует печатать с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая.

В начале заголовка помещают номер соответствующего раздела, подраздела, либо пункта. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Переносы слов в заголовках не допускаются.

6.4.3. Расстояние между заголовком и текстом должно быть равно удвоенному межстрочному расстоянию; между заголовком раздела и подраздела – одному межстрочному расстоянию.

6.5. Построение таблиц

6.5.1. Цифровой материал, как правило, оформляется в виде таблицы в соответствии с рис. 1. Горизонтальные линии, разграничивающие строки таблицы, допускается не проводить, если их отсутствие не затрудняет пользование таблицей. Высота строк таблицы должна быть не менее 8 мм.

Слева над таблицей размещают слово «Таблица», выполненное строчными буквами (кроме первой прописной), без подчеркивания, и ее номер. При этом точку после номера таблицы не ставят.

При необходимости уточнения содержания таблицы приводят ее название, которое записывают с прописной буквы (остальные строчные), над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире. Точку после наименования таблицы не ставят.

6.5.2. Таблица помещается в тексте сразу же за первым упоминанием о ней или на следующей странице. Если формат таблицы превышает А4, то ее размещают в приложении к ТД. Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны листа документа.

6.5.3. Таблицы, за исключением приведенных в приложении, нумеруются сквозной нумерацией арабскими цифрами по всему ТД. Если в ТД одна таблица, то ее обозначают «Таблица 1» или «Таблица В.1», ес-

ли она приведена в приложении В. Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения и разделяя их точкой.

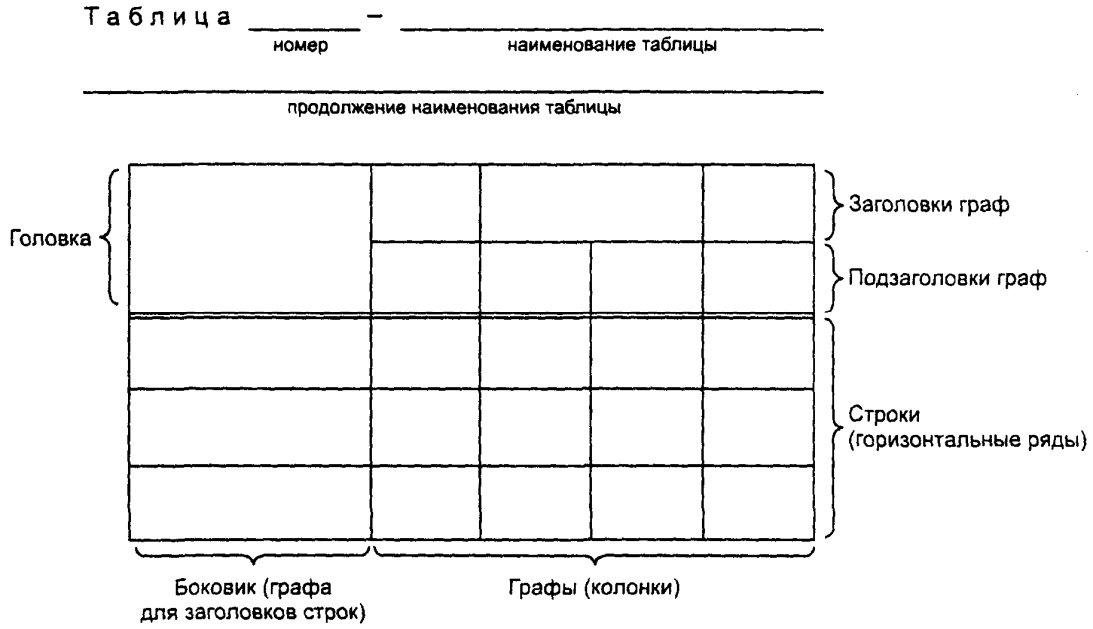


Рис. 1

Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

6.5.4. На все таблицы приводят ссылки в тексте или в приложении (если таблица приведена в приложении). Ссылки оформляют в соответствии с 6.8.

6.5.5. Заголовки граф (колонок) и строк таблицы приводят, начиная с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков граф и строк точки не ставят. Заголовки и подзаголовки граф указывают в единственном числе. Заголовки граф, как правило, записывают параллельно строкам таблицы. При необходимости допускается располагать заголовки граф перпендикулярно строкам таблицы.

Диагональное деление головки таблицы не допускается.

6.5.6. Если таблица выходит за формат страницы, то таблицу делят на части, помещая одну часть под другой, рядом или на следующей странице.

6.5.7. При делении таблицы на части слово «Таблица», ее номер и наименование помещают только над первой частью таблицы, над другими частями пишут слово «Продолжение» и указывают номер таблицы, например, «Продолжение таблицы 7».

6.5.8. Таблицы с небольшим количеством граф делят на части и помещают их рядом на одной странице, отделяя друг от друга двойной линией. При этом повторяют головку таблицы в соответствии с рис. 2.

Таблица ___

Диаметр стержня крепежной детали, мм	Масса 1000 шт. стальных шайб, кг	Диаметр стержня крепежной детали, мм	Масса 1000 шт. стальных шайб, кг
1,1	0,045	2,0	0,192
1,2	0,063	2,5	0,350
1,4	0,111	3,0	0,553

Рис. 2

6.5.9. Графу «Номер по порядку» в таблицу включать не допускается. При необходимости нумерации показателей, включенных в таблицу, порядковые номера указывают в первой графе (боковике) таблицы, непосредственно перед их наименованием в соответствии с рис. 3.

Таблица 1

Состав предыдущей загрузки на конец работы

Год эксплуатации	Тип	Число кассет	Средняя достигнутая глубина выгорание, МВт сут/кг	
			На начало работы	На конец работы
1	425n – VW – 27 (РК)	54	0	10,733
	s38n – OW – 26 (АРК)	12	0	11,817
2	425n – VW – 27 (РК)	60	12	23,617
	s38n – OW – 26 (АРК)	6	13,667	24,3
3	425n – VW – 27 (РК)	54	23,1	33,7
	s38n – OW – 26 (АРК)	12	21,65	31,067
4	425n – VW – 27 (РК)	54	32,73	42,441
	s38n – OW – 26 (АРК)	6	32,15	37,3
5	344z – K – 11 (РК)	54	41,413	48,854
	36z – H – 8 (АРК)	1	33	40,7
6	344z – K – 11 (РК)	36	45,006	48,7
Итого		349	23,378	32,735

Рис. 3

Перед числовыми значениями величин и обозначением типов, марок и т. п. продукции порядковые номера не проставляют.

6.5.10. Если цифровые данные в пределах графы таблицы выражены в одних единицах физической величины, то они указываются в заголовке каждой графы в соответствии с рис. 2. Включать в таблицу отдельную графу «Единицы измерений» не допускается.

Допускается в заголовках и подзаголовках граф отдельные понятия заменять буквенными обозначениями, но при условии, чтобы они были пояснены в тексте, например, D – диаметр, H – высота, либо установлены стандартами. Показатели с одним и тем же буквенным обозначением группируют последовательно в порядке возрастания индексов в соответствии с рис. 4.

Таблица .. Размеры в миллиметрах

Масса, кг, не более	Длина, мм	L_1	L_2	L_3
160	1000	4	5	6
170	1125	52	60	39
190	1165	389	405	247

Рис. 4

6.5.11. Обозначение единицы физической величины общей, для всех данных в строке, выносят в боковик таблицы в соответствии с рис. 5.

Таблица __

Наименование параметра	Норма для типа		
	Р - 25	Р - 75	Р-150
1	2	3	4
1 Максимальная пропускная способность, л/мин, не более	25	75	150
2 Масса, кг, не более	10	20	40

Рис. 5

6.5.12. Если необходимо привести числовые значения одного показателя в разных единицах величины, то их размещают в отдельных графах (строках). При этом в подзаголовках каждой из этих граф приводят обозначения единицы величины в соответствии с рис. 6. Допускается приводить числовые значения одного показателя в разных единицах величины в одной графе, путем заключения одного из значений, в скобки в соответствии с рис. 7.

6.5.13. Если все показатели, приведенные в графах таблицы, выражены в одной и той же единице величины, то данную единицу (начиная с предлога «в» приводят над таблицей справа.

Таблица __

Наименование материала	Температура плавления	
	К	°С
Латунь	1131—1173	858—900
Сталь	1573—1672	1300—1400
Чугун	1373—1473	1100—1200

Рис. 6

Таблиц а__

Наименование показателя		Значение показателя для патронов		
		12	16	20
Давление пороховых газов в патроннике ствола, МПа (кгс/см^2),	среднее	65 (663)	68(694)	72 (734)
	наибольшее	70(714)	74 (755)	79 (806)
Масса дробового заряда, г		От 30 до 36 включ.	От 26 до 30 включ.	От 23 до 27 включ.

Рис. 7

Если в большинстве граф таблицы приведены показатели, выраженные в одних и тех же единицах величин (например, в миллиметрах, вольтах), но имеются графы с показателями, выраженными в других единицах величин, то над таблицей приводится обобщенное наименование преобладающих показателей и единица, общая для этих показателей, например «Размеры в миллиметрах», «Напряжение в вольтах», а в заголовках (подзаголовках) остальных граф следует приводить обозначения других единиц величин (после наименования соответствующего показателя) в соответствии с рис. 8.

Таблица __

Размеры в миллиметрах

Условный проход D	*D*	L	*L*,	Ч	Масса,кг, не более
50	160	130	525	600	160
80	195	210			170

Рис. 8

6.5.14. Если ограничительные слова: «более», «не более», «менее», «не менее» или др. относятся ко всем значениям показателя (параметра, размера), то их помещают в заголовке (подзаголовке) графы или в заголовке строки после обозначения единицы величины данного показателя и отделяют от нее запятой в соответствии с рисунками 3, 4, 5, 8. При этом ограничительные слова приводят после наименования показателя, если единица величины данного показателя указана над таблицей.

6.5.15. Числовые значения величин, одинаковые для двух, нескольких или всех строк, как правило, указывают один раз в соответствии с рис. 9.

Таблица

В миллиметрах

Наружный диаметр подшипника	Канавка						D_2	Установочное кольцо				
	D_1		A		B	r		H		C	r_1	
	Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.				Номин.	Пред. откл.		Номин.	Пред. откл.
30	23,2	–0,2	2,05	–0,15	1,3	0,4	34,6	3,2	–0,1	1,10	0,4	–0,1
32	30,2											
35	33,2						39,6		–0,2			
37	34,8						41,2					
40	38,1	–0,3		–0,20			44,5				0,5	–0,2
42	39,8						46,2				0,6	–0,3

Рис. 9

6.5.16. Если повторяющийся текст состоит из двух и более слов, при первом повторении его заменяют словами «то же», а далее кавычками в соответствии с рис. 10.

Если повторяется лишь часть фразы, то допускается эту часть заменять словами «то же» с добавлением дополнительных сведений, как показано на рис. 10.

Не допускается заменять кавычками повторяющиеся в таблице цифры, математические знаки, знаки процента и номера, обозначения марок материалов и типоразмеров продукции, обозначения ссылочных стандартов.

Таблица

Оружие	Характеристика пули			Характеристика броневой защиты
	Масса, г	Тип сердечника	Скорость, м/с, ±10	
Автомат АК-74	3,5	Стальной термоупрочненный	880	Защита автомобиля при круговой обстреле
Автомат АК-47	7,9	То же	715	То же, а также защита крыши при обстреле под углами от 20° до 30° к горизонту
Винтовка СВД	9,6	То же	825	То же
Винтовка МЛ6А2	4,5	Свинцовый	890	То же

Рис. 10

6.6. Иллюстрации

6.6.1. Количество иллюстраций, помещаемых в ТД, должно быть достаточным для того, чтобы придать излагаемому тексту ясность и конкретность.

Все иллюстрации (схемы, графики, технические рисунки, фотографические снимки, осциллограммы, диаграммы и т. д.) именуются в тексте рисунками и нумеруются сквозной нумерацией арабскими цифрами по всему ТД за исключением иллюстрации приложения.

Допускается нумерация рисунков в пределах каждого раздела. Тогда номер иллюстрации составляется из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой.

Примеры

1. Рисунок 5.1, рисунок 7.5 и т. д.

2. Рисунок В.8 – восьмой рисунок Приложения В.

6.6.2. Иллюстрация располагается по тексту документа сразу после первой ссылки, если она размещается на листе формата А4. Если формат иллюстрации больше А4, ее следует помещать в приложении.

6.6.3. Иллюстрации следует размещать так, чтобы их можно было рассматривать без поворота документа или с поворотом по часовой стрелке.

6.6.4. Помещаемые в качестве иллюстраций чертежи и схемы должны соответствовать требованиям государственных стандартов единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

6.6.5. Иллюстрации следует выполнить на той же бумаге, что и текст. Цвет изображений, как правило, черный. Допускается выполнение чертежей, графиков, диаграмм, схем посредством использования компьютерной печати и в цветном исполнении.

6.6.6. Иллюстрации, при необходимости, могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «рисунок», написанное полностью без сокращения, его номер и наименование помещают ниже изображения и пояснительных данных симметрично иллюстрации.

6.6.7. Графики, отображающие качественные зависимости, изображаются на плоскости, ограниченной осями координат, заканчивающимися стрелками. При этом слева от стрелки оси координат и под стрелкой оси абсцисс проставляется буквенное обозначение соответственно функции и аргумента без указания их единиц измерения. Пример графика показан на рис. 11.

6.6.8. Графики, по которым можно установить количественную связь между независимой и зависимыми переменными, должны снабжаться координатной сеткой равномерной или логарифмической. Бук-

венные обозначения изменяющихся переменных проставляются вверху слева от левой границы координатного поля и справа под нижней границей поля. Единицы измерения проставляются в одной строке с буквенными обозначениями переменных и отделяются от них запятой. Числовые значения должны иметь минимальное число значащих цифр – не более трех. Пример показан на рис. 12.

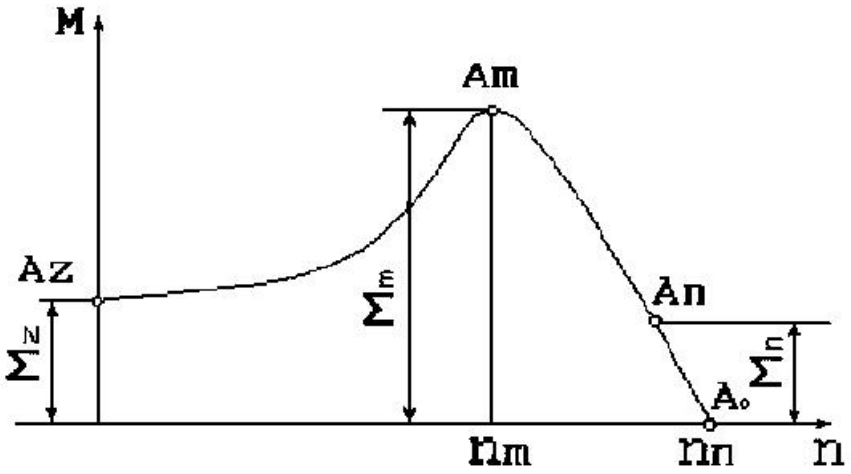


Рис. 11

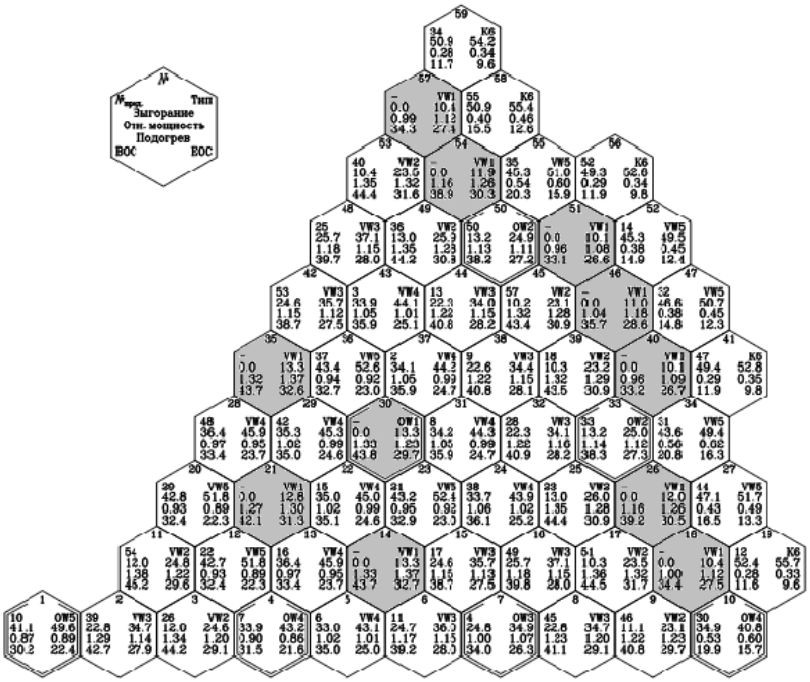


Рис. 6. Сектор симметрии 60 градусов картограммы активной зоны

Рис. 12

6.6.9. На все иллюстрации должны быть даны ссылки в тексте стандарта. ***Пример*** *– ...показан на рис. 1.*

6.7. Формулы

6.7.1. Формулы следует выделять из текста в отдельную строку.

6.7.2. Пояснение значений символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Значение каждого символа дают с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

Пример

Плотность в килограммах на кубический метр вычисляют по формуле:

$$p = m/V, \qquad (1)$$

где p – плотность, кг/ м^3;

m – масса образца, кг;

V – объем образца, м^3.

6.7.3. Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, отделяют запятой.

Пример

$$A = \frac{a}{b}, \qquad (1)$$

$$B = \frac{c}{d}. \qquad (2)$$

6.7.4. Формулы должны приводиться в общем виде с расшифровкой входящих в них буквенных значений. Буквы греческого, латинского алфавитов и цифры следует выполнять чертежным шрифтом в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД.

6.7.5. Перенос формул допускается только на знаках выполняемых математических операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак «х».

6.7.6. Формулы, за исключением приведенных в приложении, должны нумероваться сквозной нумерацией в пределах всего ТД арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Одну формулу обозначают (1).

Пример

Нумерация третьей формулы в тексте документа

$$A = bx + c. \qquad (3)$$

Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой.

Пример

(2.10) – десятая формула второго раздела.

6.7.7. Формулы, помещаемые в приложениях, нумеруют арабскими цифрами отдельной нумерацией в пределах каждого приложения, добавляя перед каждым номером обозначение данного приложения и разделяя их точкой.

Пример

(В.1) – первый рисунок Приложения В.

6.7.8. Формулы, помещаемые в таблицах или в поясняющих данных к графическому материалу, не нумеруют.

6.7.9. Допускается применять обозначения единиц в пояснениях обозначений величин к формулам. Помещать обозначение единиц физической величины в одной строке с формулами, выражающими зависимости между величинами, или между их числовыми значениями, представленными в буквенной форме, не допускается.

Примеры

1. Неправильный вариант:

$$V = S/t \text{ км/ч}, \qquad (1)$$

где S – путь, м;

t – время, с.

2. Правильный вариант:

$$V = S/t = 100/5 = 20 \text{ км/ч}, \qquad (2)$$

где V – скорость, км/ч;

S – путь, м;

t – время, с.

6.7.10. При использовании формул из первоисточников, в которых употреблены несистемные единицы, их конечные значения должны быть пересчитаны в системные единицы. Значения одного и того же параметра в пределах всего ТД должно выражаться в одних и тех же единицах физических величин.

6.7.11. При ссылке в тексте на формулы их порядковые номера приводят в скобках.

Пример

… по формуле (1).

6.7.12. Порядок изложения в ТД математических уравнений такой же, как и формул.

6.8. Ссылки

6.8.1. В ТД допускаются ссылки на данный документ, стандарты, технические условия и другие документы при условии, что они полностью и однозначно определяют соответствующие требования и не вызывают затруднений в пользовании документом.

6.8.2. Ссылаться следует на документ в целом или его разделы и приложения. Ссылки на подразделы, пункты, таблицы и иллюстрации не допускаются, за исключением подразделов, пунктов, таблиц и иллюстраций данного документа.

6.8.3. При ссылках на части данного ТД указывают номера разделов, подразделов, пунктов, подпунктов, формул, таблиц, рисунков, обозначения (и номера) перечислений и приложений, чертежей и схем, а при необходимости – также графы и строки таблиц и позиции составных частей изделия на рисунке, чертеже или схеме.

6.8.3.1. При ссылках на структурный элемент текста, который имеет нумерацию из цифр, не разделенных точкой, указывают наименование этого элемента полностью, например, «…в соответствии с разделом 5», «…по пункту 3».

6.8.3.2. Если номер (обозначение) структурного элемента состоит из цифр (буквы и цифры), разделенных точкой, то наименование этого структурного элемента не указывают, например: «…согласно 3.1», «…в соответствии с А .9 (приложение А)», «…в соответствии с 4.1.1…». Это требование не распространяется при ссылках на формулы, таблицы, перечисления и графический материал. В ссылках на них всегда упоминают наименование элемента ТД, например, «…по формуле (3.3)…», «… в табл. В.2 (приложение В)…», «… на рис. 1.2…», «… в соответствии с перечислением б) 4.2.2…», «…в части показателя 1 табл. 2».

6.8.3.3. Ссылки в тексте на таблицы и иллюстрации оформляют по типу: «… в соответствии с табл. 5.3», «… в соответствии с рис. 1.2»; «… как показано поз. 12 и 13 на рис. В.7 (приложение В)», «… в табл. 1.1, графа 4», «… в табл. В.2 (приложение В)…», причем наименование элемента всегда приводится полностью. Сокращения табл. и рис. в тексте не допускаются.

6.8.3.4. Ссылки на чертежи и схемы, выполненные на отдельных листах, делают с указанием обозначений, например: «…как показано на схеме ФЮРА. 443322.003 ЭЗ, элементы С12-С17, R20-R25…», «… приведено на чертеже общего вида ФЮРА.482211.018ВО», «…поз.5,18–24 сборочного чертежа ФЮРА.483899.002 СБ».

6.8.3.5. При ссылках на обязательные приложения используют слова: «…в соответствии с приложением __», а при ссылках на рекомендуемые и справочные – слова: «… приведен в приложении __». При этом статус приложений не указывают.

6.8.4. При ссылке в тексте на использованные источники следует приводить их номера, заключенные в квадратные скобки, например: «… как указано в монографии [103]»; «… в работах [11, 12, 15–17]». Допускается вместо квадратных скобок выделять номер источника двумя косыми чертами, например /17/.

6.8.5. При ссылках на стандарты и технические условия указывают только их обозначение, при этом допускается не указывать год их утверждения при условии полного описания их в списке использованных источников по ГОСТ 7.1. При ссылке на несколько стандартов повторяют индексы стандартов.

6.9. Оформление расчетов

6.9.1. Порядок изложения расчетов в ТД определяется характером рассчитываемых величин. Расчеты должны выполняться с использованием единиц системы СИ.

6.9.2. Порядок изложения расчетов в тексте ВКР определяется характером рассчитываемых величин. Согласно ЕСКД расчеты в общем случае должны содержать:

– эскиз или схему рассчитываемого изделия;
– задачу расчета (с указанием, что требуется определить при расчете);
– данные для расчета;
– условия расчета;
– расчет;
– заключение.

6.9.2.1. Эскиз или схему допускается вычерчивать в произвольном масштабе, обеспечивающем четкое представление о рассчитываемом объекте.

6.9.2.2. Данные для расчета, в зависимости от их количества, могут быть изложены в тексте или оформлены в виде таблицы (см. приложение И).

6.9.2.3. Условия расчета должны пояснять особенности принятой расчетной модели и применяемые средства автоматизации инженерного труда. Приступая к расчету, следует указать источник литературы, в соответствии с которым выполняются конкретные расчеты.

Пример

«Расчет режима проводим по методике, изложенной в [2]».

6.9.2.4. Расчет, как правило, разделяют на пункты, подпункты или перечисления. Пункты (подпункты, перечисления) расчета должны иметь пояснения, например; «определяем…»; «по графику, приведенному на рисунке 3.4, находим…»; «согласно рекомендациям [4], принимаем…».

В изложении расчета, выполненного с применением ЭВМ, следует привести краткое списание методики расчета с необходимыми формулами и, как правило, структурную схему алгоритма или программы расчета. Распечатка расчета с ЭВМ помещается в приложении ТД, а в тексте делается ссылка, например, «… результаты расчета на ЭВМ приведены в приложении С».

6.9.2.5. Заключение должно содержать выводы о соответствии объекта расчета требованиям, изложенным в задаче расчета.

Пример

Заключение: заданные допуски на размеры составных частей позволяют обеспечить сборку изделия по методу полной взаимозаменяемости.

6.9.3. Все расчеты, как правило, должны выполняться с использованием единиц физических величин, выраженных в системе СИ.

6.10. Нумерация листов ТД

6.10.1. Все листы ТД, включая приложения, должны иметь сквозную нумерацию. Первым листом является титульный лист.

6.10.2. Номер листа проставляется в его правом нижнем углу. На титульном листе номер не проставляется.

6.10.3. При выполнении ТД по формам 9 и 9а ГОСТ 2.106 с основными надписями по формам 2 и 2а ГОСТ 2.104 номер листа проставляется в соответствующей графе основной надписи. Заглавным листом ТД следует считать первый лист содержания.

7. Правила оформления графического материала

7.1. Общие требования

7.1.1. Графический материал представленный в виде чертежей, эскизов и схем, характеризующих основные выводы и предложения исполнителя, должен совместно с ТД раскрывать или дополнять содержание.

7.1.2. Состав и объем графического материала применительно к работам по конкретной образовательной специальности или конкретному образовательному направлению должны определяться методическими указаниями профилирующей кафедры. Количество ГМ должно быть достаточно для пояснения излагаемого текста.

7.1.3. Графический материал, выполненный в виде рисунков, следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые.

7.1.4. Графический материал, выполненный в виде самостоятельного документа, например, конструкторский документ – чертеж, схема, должен иметь рамку и в правом нижнем углу листа основную надпись по ГОСТ 2.104. Такой графический материал выносится в приложение к тексту ТД.

7.1.5. Графический материал, предназначенный для демонстрации при публичной защите работы, оформляется в соответствии с 7.8:

7.1.6. Графический материал должен отвечать требованиям действующих стандартов по соответствующему направлению науки, техники или технологии и может выполняться: неавтоматизированным методом – карандашом, пастой, чернилами или тушью, либо автоматизированным методом – с применением графических и печатающих устройств вывода ЭВМ.

Цвет изображений – черный на белом фоне. В оформлении всех листов графического материала следует придерживаться единообразия.

7.1.7. При выполнении чертежей и схем автоматизированным методом допускается все элементы чертежа (схемы) пропорционально уменьшать, если это не затрудняет чтение документа.

7.1.8. Если чертежи и схемы представляются на технических носителях данных ЭВМ, в конце ТД рекомендуется приводить их копии на бумаге с уменьшением до формата А4 или А3, о чем должна быть сделана запись в содержании в соответствии с приложением Е.

7.1.9. На весь графический материал должны быть ссылки в тексте ТД, оформленные в соответствии с 6.8.

7.2. Оформление чертежей деталей и сборочных чертежей

7.2.1. Оформление чертежей деталей и сборочных чертежей должно соответствовать требованиям стандартов ЕСКД.

7.2.2. На чертеже детали должны быть указаны:

– все размеры, необходимые для изготовления данной детали с указанием предельных отклонений размеров, причем предельные отклонения размеров должны соответствовать требованиям стандартов Единой системы допусков и посадок (ЕСДП);

– шероховатость поверхностей детали, выполняемых по данному чертежу, независимо от метода их образования;

– технические требования, которые должны располагаться над основной надписью чертежа;

– условные обозначения марки материала в соответствии со стандартами или техническими условиями на данный материал.

7.2.3 На сборочных чертежах должны быть указаны:

– габаритные размеры изделия;

– установочные и присоединительные размеры сборочной единицы (прибора, блока, узла и т. п.), при этом должны быть нанесены:

а) координаты расположения, размеры с предельными отклонениями элементов, служащих для соединения с сопрягаемыми изделиями;

б) другие параметры, например, для зубчатых колес, служащих элементами внешней связи, модуль, количество и направление зубьев;

– технические требования, предъявляемые к сборке изделия;

– номера позиций, указанные в спецификации сборочной единицы.

Номера позиций наносят на полках линий-выносок, проводимых от изображений составных частей. Номера позиций указывают на тех изображениях, на которых соответствующие составные части проецируются как видимые, как правило, на основных видах и заменяющих их разрезах.

Номера позиций располагают параллельно основной надписи чертежа вне контура изображения и группируют в колонку или строчку по возможности на одной линии. Номер позиций наносят на чертеж, как правило, один раз.

Размер шрифта номеров позиций должен быть на один–два номера больше, чем размер шрифта, принятого для размерных чисел на том же чертеже.

При выполнении чертежей деталей и сборочных чертежей необходимо пользоваться нормативно-технической документацией, приведенной в приложении К.

7.3. Спецификация изделия

7.3.1. Спецификация определяет состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и необходима для его изготовления, комплектования конструкторских документов и планирования запуска в производство указанных изделий. В спецификацию вносят составные части, входящие в специфицируемое изделие, а также конструкторские документы, относящиеся к этому изделию и его неспецифицируемым составным частям.

7.3.2. Спецификация в общем случае должна состоять из следующих разделов:

– документация;
– комплексы;
– сборочные единицы;
– детали;
– стандартные изделия;
– прочие изделия;
– материалы;
– комплекты.

Наличие тех или иных разделов определяется составом самого изделия. Наименование каждого раздела указывают в виде заголовка в графе «Наименование» и подчеркивают. Заполнение разделов спецификации – по ГОСТ 2.106.

7.3.3. Спецификацию составляют на отдельных листах формата А4 по формам 1, 1а, приведенным ГОСТ 2.106 (приложение А). Допускается помещать спецификацию на поле сборочного чертежа. При этом ее заполняют в том же порядке и по той же форме, что и спецификацию, выполненную на отдельных листах.

7.4. Оформление чертежей общего вида

7.4.1. Чертеж общего вида – это документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его основных составных частей и поясняющий принцип работы изделия.

7.4.2. Чертеж общего вида должен содержать:

– изображения изделия (виды, разрезы, сечения), текстовую часть и надписи, необходимые для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы изделия;

– размеры и другие, наносимые на изображения, данные (при необходимости);

– схему, если она требуется, но оформлять ее отдельным документом нецелесообразно;

– технические характеристики изделия, его состав и назначение.

7.4.3. Чертежи общего вида следует выполнять, как правило, в аксонометрических проекциях. Изображения выполняют с максимальными упрощениями, предусмотренными стандартами ЕСКД для рабочих чертежей.

7.4.4. Наименования и обозначения составных частей на чертежах общего вида необходимо указывать одним из следующих способов:

– на полках линий-выносок;

– в таблице, размещаемой на том же листе, что и изображение изделия.

При наличии таблицы номера позиций составных частей, включенных в таблицу, указывают на полках линий-выносок.

7.5. Оформление схем

7.5.1. Оформление электрических схем должно соответствовать требованиям стандартов, приведенных в приложении Л. Перечень элементов для электрических схем следует выполнять в соответствии с ГОСТ 2.702.

7.5.1.1. На принципиальной схеме изображают все электрические элементы или устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы (соединители, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

7.5.1.2. Схемы выполняют для изделий, находящихся в отключенном положении. В технически обоснованных случаях допускается отдельные элементы схемы изображать в выбранном рабочем положении с указанием на поле схемы режима, для которого изображены эти элементы.

7.5.1.3. Элементы и устройства изображают на схеме в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах Единой системы конструкторской документации.

7.5.1.4. Элементы и устройства изображают на схемах совмещенным или разнесенным способом. При совмещенном способе составные части элементов или устройств изображают на схеме в непосредственной близости друг к другу. При разнесенном способе составные части элементов и устройств или отдельные элементы устройств изображают

на схеме в разных местах таким образом, чтобы отдельные цепи изделия были изображены наиболее наглядно.

7.5.1.5. В схеме следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов (устройств), нанесенные на изделие или установленные в их документации.

7.5.7.6. При необходимости на схеме обозначают электрические цепи. Эти обозначения должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.709.

7.5.1.7. Для упрощения схемы допускается несколько электрически не связанных линий связи сливать в линию групповой связи, но при подходе к контактам (элементам) каждую линию связи изображают отдельной линией. При слиянии линий связи каждую линию помечают в месте слияния, а при необходимости и на обоих концах условными обозначениями (цифрами, буквами или сочетанием букв и цифр) или обозначениями, принятыми для электрических цепей. Обозначения линий проставляют в соответствии с требованиями, приведенными в ГОСТ 2.721.

7.5.1.8. Позиционные обозначения элементам (устройствам) присваивают в пределах конкретного изделия, при этом порядковые номера элементам (устройствам) следует присваивать, начиная с единицы, в пределах группы элементов (устройств), которым на схеме присвоено одинаковое буквенное позиционное обозначение, например, R1, R2, R3 и т. д., C1,C2, C3 и т. д.

Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо. При необходимости допускается изменять последовательность присвоения порядковых номеров в зависимости от размещения элементов в изделии, направления прохождения сигналов или функциональной последовательности процесса.

7.5.1.9. Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условными графическими обозначениями элементов и (или) устройств с правой стороны или над ними.

7.5.2. Оформление схем алгоритмов, программ, данных и систем выполняется в виде символов и должно соответствовать ГОСТ 19.701.

7.5.2.1. Символ предназначен для графической идентификации функции, которую он отображает, независимо от текста внутри этого символа.

7.5.2.2. Символы в схеме должны быть расположены равномерно и быть, по возможности, одного размера. Не должны изменяться углы и другие параметры, влияющие на соответствующую форму символов. Следует придерживаться разумной длины соединений и минимального числа длинных линий.

7.5.2.3. Символы могут быть вычерчены в любой ориентации, но по возможности предпочтительной является горизонтальная ориентация.

Зеркальное изображение формы символа обозначает одну и ту же функцию, но не является предпочтительным.

7.5.2.4. Минимальное количество текста, необходимого для понимания функции данного символа, следует помещать внутри символа. Текст для чтения должен записываться слева направо и сверху вниз независимо от направления потока. Пример выполнения текста символа приведен на рис. 13.

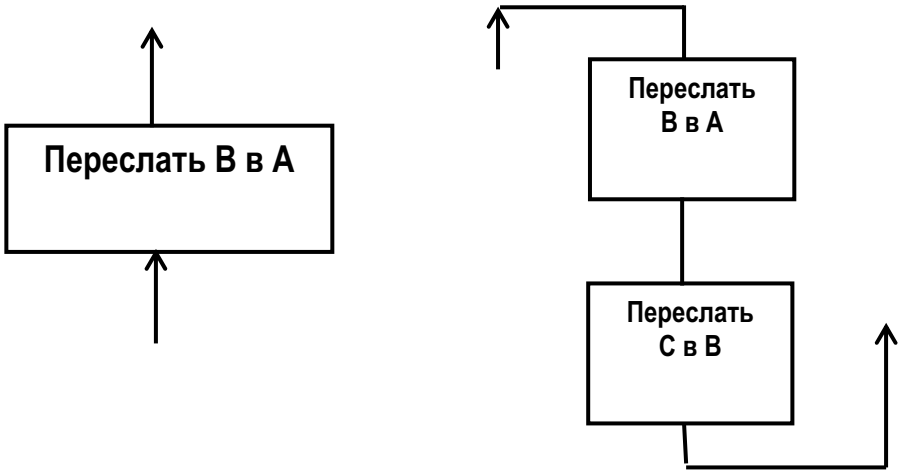


Рис. 13

7.5.3. Оформление схем в работах, связанных с созданием АСУ, должно соответствовать ГОСТ 24.302 и ГОСТ 24.303

7.6. Правила оформления технологических документов

7.6.1. Технологические документы, разрабатываемые в процессе ВКР, в области машиностроения, электро- и радиотехники должны оформляться в соответствии с требованиями стандартов ЕСТД.

7.6.2. К технологическим документам, подлежащим разработке, относятся:

– титульный лист, оформленный в соответствии с рекомендациями ГОСТ 3.1105;

– маршрутная карта по ГОСТ 3.1404;

– операционные карты механической обработки по ГОСТ 3.1404;

– операционные карты слесарных, слесарно-сборочных и монтажных работ по ГОСТ 3.1407;

– карты технологического процесса на изготовление изделий на автоматических линиях;

– карты эскизов по ГОСТ 3.1105;

– операционные карты технического контроля по ГОСТ 3.1105;

– операционные карты на процессы перемещения;

– другие виды технологических документов, указанные в ГОСТ 3.1102–81.

7.6.3. Технологические документы, размещают в приложении и оформляют в виде самостоятельного документа на основе соответствующего стандарта, либо в виде текстовой части ВКР, выполненной как продолжение ТД.

7.7. Правила оформления программных документов

7.7.1. Программные документы, разработанные в проектах (работах) различных проблемных областей, должны быть оформлены в соответствии с требованиями стандартов Единой системы программной документации. Рекомендуемые виды программных документов включают:

– текст программы, оформленный по ГОСТ 19.401;

– описание программы, выполненное по ГОСТ 19.402;

– описание применения, оформленное согласно требованиям ГОСТ 19.502;

– руководство программиста, выполненное в соответствии с ГОСТ 19.504;

– другие программные документы согласно перечню, приведенному в ГОСТ 19.101.

Программные документы должны быть сброшюрованы в ТД ВКР в виде приложения или представлены отдельной частью проекта (работы).

7.8. Оформление демонстрационного материала

7.8.1. Демонстрационный материал оформляется в виде демонстрационных листов (плакатов) либо слайдов. Демонстрационный материал (графический материал к экономической и технологической частям, к разделу по безопасности жизнедеятельности, экспериментальные данные) должен отвечать требованиям наибольшей наглядности и свободно просматриваться с расстояния 3–5 м.

7.8.2. Демонстрационный лист может выполняться:

– неавтоматизированным методом – карандашом, пастой, чернилами или тушью;

– автоматизированным методом – с применением графических печатающих устройств вывода ЭВМ.

7.8.3. При выполнении демонстрационного листа на бумажном носителе допускается использовать чертежную бумагу стандартных форматов: минимальный формат листа – А3 (297×420 мм), максимальный – А1 (594×840 мм).

7.8.3.1. Демонстрационный лист должен содержать:

– заголовок;

– необходимые изображения и надписи (рисунки, схемы, таблицы и т. д.);

– пояснительный текст (при необходимости).

Заголовок должен быть кратким и соответствовать содержанию демонстрационного листа. Его располагают в верхней части листа посередине. Заголовок, надписи и пояснительный текст следует выполнять чертежным шрифтом размера не менее 14 мм.

Пояснительный текст располагают на свободном поле листа.

7.8.3.2. Элементы графиков, таблиц, диаграмм (надписи, линии, условные изображения) должны выполняться в соответствии с требованиями действующих стандартов ЕСКД.

7.8.3.3. Графические обозначения элементов на демонстрационных листах можно увеличивать пропорционально размерам, указанным в стандарте, для более удобного чтения чертежей перед комиссией.

7.8.4. При оформлении демонстрационного материала в виде слайдов необходимо придерживаться следующих правил:

– заглавный слайд должен содержать тему доклада, сведения об авторах и возможных соавторах;

– шрифт должен быть не менее 12 пикселей;

– все слайды за исключением заглавного должны иметь заглавную строку. выполненную шрифтом Гельветика жирный, размер 40 пикселей;

– все слайды должны иметь логотип, а также фамилию докладчика.

7.8.4.1. Слайды выполняются преимущественно без рамки. Если рамка необходима, то выполнять ее рекомендуется не в виде жирной и черной, а в виде темно-серой растровой.

7.8.4.2. Размер слайдов рекомендуется уменьшать до 90 % А4, чтобы они проецировались полностью.

7.8.5. При оформлении демонстрационного материала допускается применение цветных изображений и надписей. Цвета должны подходить друг другу, не желательно применять слишком много цветов. Принятые цифровые и цветовые обозначения должны быть расшифрованы.

7.8.6. Графический материал оформляется с учетом общих требований, приведенных в 7.1.

7.8.7. Текстовый материал оформляется с учетом общих требований, приведенных в разделе 6.

8. Обозначение документов

8.1. ВКР дипломированного специалиста, а также конструкторским документам на разрабатываемое изделие в целом (ПЗ, сборочный чертеж, схема принципиальная, электрическая и т. п.) следует присваивать в указанной последовательности:

– четырехзначный буквенный код организации-разработчика, назначаемый по кодификатору. Для ТПУ Госстандартом утвержден код ФЮРА;

– шестизначный код классификационной характеристики разрабатываемого изделия, составленный в соответствии с классификатором ЕСКД;

– порядковый регистрационный номер. Для изделий его присваивают по классификационной характеристике от 001 до 999 в пределах кода организации-разработчика. Чертежам деталей присваивают порядковые номера позиций по чертежам общего вида. Если деталь имеет позицию 15, то порядковый регистрационный номер ее – 015;

– шифр документа по ГОСТ 2.102 или ГОСТ 2.701.

Пример обозначения сборочного чертежа –

ФЮРА	*.*	*XXXXXX*	*.*	*004*	*СБ*
Код орга-низ.-разраб.		*Характеристика по классифика фикатору*		*Поряд ковый номер изделия*	*Шифр документа по ГОСТ 2.102*

8.2. В основу обозначения технологической документации в проектах следует брать:

– код организации-разработчика;

– код характеристики документа;

– порядковый регистрационный номер.

Код характеристики документа выбирают по ГОСТ 3.1201. Порядковые регистрационные номера присваиваются предприятием-разработчиком в пределах от 00001 до 99999.

Пример обозначения карты технологического процесса литья в песочные формы –

ФЮРА	*.*	*50111*	*.*	*00005*
Код организ. -разраб.		*Характеристика по ГОСТ 3.1201-85*		*Порядковый регистрационный номер*

8.3. Структуру обозначения программ и программных документов устанавливают ГОСТ 19.101 и ГОСТ 19.103.

Пример обозначения программы и ее программного документа –

643.	*ФЮРА .*	*00001*	*–*	*01*
Код страны по ОК 025-2001	*Код организ. -разраб.*	*Регистра-ционный номер*		*Номер редакции документа*

Пример обозначения других программных документов –

643.	*ФЮРА*	.	*00001 –*	*01*	*81*	*02*
Код страны по ОК 025-2001	*Код организ. -разраб.*		*Регистра-ционный номер*	*Номер редакции доку-мента*	*Код вида доку-мента*	*Номер документа данного вида*

Код страны определяют по классификатору ОК 025-2001 Общероссийский классификатор стран мира.

Регистрационный номер присваивают в порядке возрастания, начиная от 000001 до 99999 до утверждения Общесоюзного классификатора программ.

Номер редакции присваивают в порядке возрастания от 01 до 99.

Код вида документа присваивают в соответствии с ГОСТ 19.101.

Номер документа данного вида присваивают в порядке возрастания от 01 до 99.

Номер части одного и того же документа присваивают в порядке возрастания с 1 до 9.

8.4. На техническую документацию АСУ всех видов правила обозначения документов устанавливает ГОСТ 34.201.

Пример обозначения документа на АСУ –

ФЮРА	.	*00001*	.	*001*	.	*3А*
Код организ. -разраб.		*Код классиф. хар-ки*		*Регистра-ционный номер АСУ*		*Код типа доку-мента*

Код классификационной характеристики присваивают в соответствии с Общесоюзным классификатором АСУ и их частей.

До утверждения классификатора допускается код классификационной характеристики присваивать в соответствии с отраслевой нормативно-технической документацией или приводить в качестве кода классификационной характеристики порядковый номер АСУ в целом или ее частей, разработанных в организации.

Регистрационный номер присваивают с 001 до 999 по каждому коду классификационной характеристики.

Код типа документа присваивают по ГОСТ 34.201.

Приложение А

(обязательное)

Форма титульного листа
курсового проекта

Наименование ведомства, в систему которого входит вуз –
строчными буквами, кроме первой прописной

Наименование вуза – прописными буквами

Наименование факультета – _____
Наименование направления (специальности) –
Наименование выпускающей кафедры –
строчными буквами, кроме первой прописной

Тема проекта – прописными буквами

Наименование текстового документа работы –
строчными буквами, кроме первой прописной

_____
Обозначение (при наличии)

Студент , группа (подпись) И.О. Фамилия

Руководитель
(должность, ученая степень, звание) (подпись) И.О. Фамилия
(дата)

Город – 20 __

Приложение Б

Форма задания на выполнение курсового проекта

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра_____

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой_____(И.О. Фамилия)
(подпись, дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение курсового проекта

Студенту гр._____ _____
(номер группы) (Фамилия.. имя , отчество)

1. Тема курсового проекта _____
_____

2. Срок сдачи студентом готовой работы _____

3. Исходные данные к проекту _____

_____

4. Содержание текстового документа (перечень подлежащих разработке вопросов)
_____
_____

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)
5.1. _____
5.2. _____
5.3. _____
5.4. _____
5.5. _____
5.6. _____

6. Консультанты по разделам курсового проекта
(с указанием разделов)
6.1. _____
6.2. _____

6.3. _____
6.4. _____

7. Дата выдачи задания на выполнение выпускной курсового проекта
_____

Руководитель_____ (И.О. Фамилия)
(подпись, дата)

Задание принял к исполнению

_____ (И.О. Фамилия)
(подпись, дата)

Приложение В

(обязательное)

Пример оформления содержания

Содержание

		С.
	Введение	5
1.	Комплекс программ нейтронно-физических расчетов «КАСКАД»	6
2.	Формирование схемы загрузки активной зоны	9
	2.1. Расстановка кассет с наибольшей глубиной выгорания на периферии	9
	2.2. Оптимизация загрузки по коэффициенту неравномерности энерговыделения	14
3.	Топливные кассеты второго поколения	17
	3.1. Общая характеристика конструкции кассет второго поколения	17
	3.2. Чехлы рабочей кассеты и тепловыделяющей сборки	31
4.	Технико-экономичесское обоснование	35
	Заключение	41
	Список использованных источников	43
	Приложение А Методика расчета надежности	45
	Приложение Б ФЮРА. 424121.001 РЭ Кассета ТВС-У. Условия эксплуатации	46
	Приложение В Fuel management scheme Part 3 ***(Изм. № 1)***	47
	ФЮРА. 424121.001 ЭЗ Блок детектирования. Схема электрическая принципиальная	49
	ФЮРА. 424121.001 ПЭЗ Блок детектирования. Перечень элементов	50
	Дискета 3,5 " :	В конверте на обороте обложки
	ФЮРА. 424121.001 Тепловыделяющая сборка. Сборочный чертеж. Файл blok.pkd в формате PCAD 8.5	
	ФЮРА. 424121.001 Дистанционирующая решетка. Файл blok.pob в формате PCAD 8.5	
	Графический материал:	На отдельных листах
	ФЮРА. 424121.001 АЗ Активная зона. Схема структурная.	
	ФЮРА. 424121.001 ТВС Тепловыделяющая сборка. Чертеж общего вида.	
	ФЮРА. 424121.001 ПЗ Профили энерговыделения. Диаграммы временные	
	Технико-экономическое обоснование разработки схемы загрузки топлива	(демонстра-ционный лист)

Приложение Г

Список литературы

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
2. Большагин С.Н. и др. Программа БИПР-7А (версия 1.2). Описание применения. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 32/1–54–97, Москва, 1997.
3. Большагин С.Н. и др. Программа ПЕРМАК-А. Описание применения. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 32/1–55–97, Москва, 1997.
4. Павловичев А.М., Орлов В.И. Аннотация программы оптимизации перегрузок реакторов ВВЭР (ПРОРОК-2). ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. Вып. 5 (34), 1983. – С. 73.
5. N.A. Bychkova M.JU.Tomilov. The RRC «KI» Software Package for Neutronic Calculations. Software Package KASKAD. Program of interactive control of the complex. Description of application.
6. Suslov A.A. Shishkov L.K. Bolshagin S.N. The RRC «KI» Software Package for Neutronic Calculations. Software Package KASKAD. The code BIPR-7A. Description of Algorithm.
7. Bolshagin S.N., Tomilov M.Yu. The RRC «KI» Software Package for Neutronic Calculations. Software Package KASKAD. The code BIPR-7A. Description of application.
8. Aleshin S.S., Bolshagin S.N., Tomilov M.Yu. The RRC «KI» Software Package for Neutronic Calculations. Software Package KASKAD. Code PERMAK-AT. Description of Algorithm.
9. Aleshin S.S., Bolshagin S.N., Tomilov M.Yu. The RRC «KI» Software Package for Neutronic Calculations. Software Package KASKAD. Code PERMAK-AT. Instruction For Calculation Performance.
10. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978 – 352 с.
11. Naft B.N., Sesonske A.Pressurized Water Reactor Optimal Management. Nucl.Technol., 1972. – Vol. 14. – P. 123.
12. Петрунин Д.М. и др. «БИПР-5 – программа для расчета трехмерных полей энерговыделений и выгорания топлива», Препринт ИАЭ-2518, 1975.
13. Надставка. Сборочный чертеж 444.03.000СБ, ОАО «МСЗ», 1999 (инв. ВП -1505 ОКБ «Гидропресс»).
14. Комплекс кассет второго поколения реактора ВВЭР-440. Ведомость технического проекта. 463 ТП, ОКБ «Гидропресс».
15. Кассета рабочая. Сборочный чертеж. 440.01.000СБ, ОАО «МСЗ», 1999 (инв. ВП-1505 ОКБ «Гидропресс»).
16. Сборка тепловыделяющая. Сборочный чертеж. 440.02.000СБ, ОАО «МСЗ», 1999 (инв. ВП-1505 ОКБ «Гидропресс»).
17. Отчет «Состояние дистанционирующих решеток из сплава Э-110 после эксплуатации в составе рабочей ТВС № 13626135 на 4 блоке НВАЭС в течение четырех топливных циклов», № 0–4417, ГНЦ РФ НИИАР, 1995.

18. Свойства материалов оболочки и топливных таблеток реактора ВВЭР-1000, отчет ВНИИНМ. 312–0–001. М ГКАЭ. 1983 (инв. № 211351 ОКБ «Гидропресс»).
19. Уинер Р. Язык Турбо Си: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 384 с.
20. Страуструп Б. Язык программирования Си++: пер. с англ. – М.: Радио и связь. 1991. – 352.
21. Романов В.Ю. Программирование на языке С++: Практический подход. – М.: Компьютер, 1993. – 160 с.
22. Безопасность атомных станций: справочник. М. – Париж: EDF – Росэнергоатом, 1995.
23. Ядерные энергетические установки / Б.Г. Ганчев, Л.Л. Калишевский, Р.С. Демешев и др. – М.: Энергоатом издат, 1990.
24. Повышение эффективности топливоиспользования и совершенствование систем обращения с ядерным топливом на АЭС с ВВЭР-440 / Ю.В. Коломцев, В.В. Омельчук, Ю.Н. Пыткин, С.А. Андрушечко, С.Н. Голощапов, Н.И. Попов, В.А. Адеев. – СПб., 2000. – 232 с.
25. Справочник по ядерной энерготехнологии: пер. с англ. / Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
26. Безопасность ядерных энергетическихустановок: учебное пособие для вузов / О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.М. Бахметьев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
27. Н.П. Шаманов, Г.Е.Романцов. Судовые ядерные реакторы: учебник. – Л.: Судостроение, 1984. – 232 с.
28. Юркевич Г.П. Системы управления энергетическими реакторами / под ред. академика РАН Н.С. Хлопкина. – М.: Издательство ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.
29. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89). ПНАЭ Г–1–024–90. М., 1991.
30. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967.
31. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. ПНАЭ Г–01–011–97. М., 1997.
32. Основные правила обеспечения эксплуатации атомных станций. 3-е изд. – М., 2002.

Приложение Д

(справочное)

Таблица К.1

Перечень нормативной документации, используемой при оформлении чертежей

Обозначение	***Наименование***
ГОСТ 2.102–68	ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов
ГОСТ 2.104–2000	ЕСКД. Основные надписи
ГОСТ 2.106–68	ЕСКД. Текстовые документы
ГОСТ 2.109–73	ЕСКД. Основные требования к чертежам
ГОСТ 2.113–75	ЕСКД. Групповые и базовые конструкторские документы
ГОСТ 2.201–80	ЕСКД. Обозначение изделий и конструкторских документов
ГОСТ 2.301–68	ЕСКД. Форматы
ГОСТ 2.302–68	ЕСКД. Масштабы
ГОСТ 2.303–68	ЕСКД. Линии
ГОСТ 2.304–81	ЕСКД. Шрифты чертежные
ГОСТ 2.305–68	ЕСКД. Изображения-виды, разрезы, сечения
ГОСТ 2.306–68	ЕСКД. Обозначение графических материалов и правила их нанесения на чертежах
ГОСТ 2.307–68	ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений, Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки
ГОСТ 2.308–79	ЕСКД. Указания на чертежах допусков форм и расположения поверхностей
ГОСТ 2.309–73	ЕСКД. Обозначение поверхностей шероховатости
ГОСТ 2.310–68	ЕСКД. Нанесение на чертежах обозначений покрытий, термической и других видов обработки
ГОСТ 2.311–68	ЕСКД. Изображение резьбы
ГОСТ 2.312–72	ЕСКД. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений
ГОСТ 2.314–68	ЕСКД. Указания на чертежах о маркировании и клеймении изделий
ГОСТ 2.315–68	ЕСКД. Изображения упрощенные и условные крепежных деталей
ГОСТ 2.316–68	ЕСКД. Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц
ГОСТ 2.317–69	ЕСКД. Аксонометрические проекции
ГОСТ 2.318–81	ЕСКД. Правила упрощенного нанесения размеров отверстий
ГОСТ 2.321–84	ЕСКД. Обозначения буквенные

ГОСТ 2.412–81	ЕСКД. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий
ГОСТ 2.413–72	ЕСКД. Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготовляемых с применением электрического монтажа
ГОСТ 2.414–75	ЕСКД. Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов
ГОСТ 2.415–68	ЕСКД. Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками
ГОСТ 2.416–68	ЕСКД. Условные изображения сердечников магнитопроводов
ГОСТ 2.417–91	ЕСКД. Платы печатные. Правила выполнения чертежей
ГОСТ 2789–73	Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
ГОСТ 16093–81	Резьба метрическая. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски. Посадки с зазором

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

26-ти групповые константы для расчета ядерных реакторов

Спектры нейтронов деления

i	E_n	Δu	ε_i при ν, равном				
			2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	0,016	0,017	0,018	0,020	0,021
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	0,088	0,092	0,095	0,098	0,101
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	0,184	0,186	0,188	0,190	0,192
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	0,270	0,270	0,269	0,268	0,267
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	0,202	0,200	0,198	0,196	0,194
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	0,141	0,139	0,137	0,135	0,133
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	0,061	0,060	0,059	0,058	0,057
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	0,024	0,023	0,023	0,022	0,022
9	46,5–100 *кэв*	0,77	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Водород (H)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,20	0,000	0,00	1,20	0,667	1,00	1,04
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,65	0,000	--	1,65	0,667	1,00	1,36
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,20	0,000	--	2,20	0,667	1,00	1,74
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,00	0,000	--	3,00	0,667	1,00	2,28
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	4,10	0,000	--	4,10	0,667	1,00	3,12
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	5,70	0,000	--	5,70	0,667	1,00	4,13
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	8,10	0,000	--	8,10	0,667	1,00	5,87
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,0	0,000	--	11,0	0,667	1,00	7,97
9	46,5–100 *кэв*	0,77	14,0	0,000	--	14,0	0,667	1,00	9,77
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	16,6	0,000	--	16,6	0,667	1,00	11,6
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	18,5	0,000	--	18,5	0,667	1,00	12,9
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	19,3	0,000	--	19,3	0,667	1,00	13,5
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	19,7	0,001	--	19,7	0,667	1,00	13,8
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	20,0	0,001	--	20,0	0,667	1,00	14,0
15	465–1000 *эв*	0,77	20,1	0,002	--	20,1	0,667	1,00	14,0
16	215–465 *эв*	0,77	20,2	0,003	--	20,2	0,667	1,00	14,1
17	100–215 *эв*	0,77	20,2	0,004	--	20,2	0,667	1,00	14,1
18	46,5–100 *эв*	0,77	20,3	0,006	--	20,3	0,667	1,00	14,2
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	20,3	0,009	--	20,3	0,667	1,00	14,2
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	20,3	0,014	--	20,3	0,667	1,00	14,2
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	20,3	0,020	--	20,3	0,667	1,00	14,2

22	2,15–4,65 *эв*	0,77	20,3	0,030	--	20,3	0,667	1,00	14,2
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	20,320,4	0,044	--	20,320,3	0,667	1,00	14,2
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	20,4	0,064	--	20,3	0,667	1,00	14,2
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	20,6	0,093	--	20,3	0,667	1,00	14,2
T	0,0252 *эв*	--		0,332	--		0,667	--	--

i	$\sigma_{e\,(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**										
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	0,160	0,400	0,240	0,176	0,096	0,064	0,032	0,016	0,009	0,004	0,003
2	0,287	0,512	0,375	0,205	0,136	0,068	0,034	0,018	0,008	0,004	0,003
3	0,457	0,767	0,418	0,279	0,139	0,070	0,037	0,018	0,009	0,004	0,002
4	0,725	0,975	0,650	0,325	0,163	0,087	0,040	0,019	0,009	0,004	0,003
5	0,984	1,558	0,779	0,389	0,209	0,097	0,045	0,021	0,010	0,004	0,004
6	1,570	2,065	1,033	0,553	0,257	0,119	0,055	0,026	0,012	0,006	0,004
7	2,231	2,936	1,572	0,732	0,338	0,157	0,073	0,034	0,016	0,007	0,004
8	3,029	4,270	1,984	0,919	0,427	0,199	0,092	0,043	0,020	0,009	0,008
9	4,227	5,238	2,430	1,128	0,524	0,243	0,113	0,052	0,024	0,011	0,010
10	5,012	6,210	2,882	1,338	0,621	0,288	0,134	0,062	0,029	0,013	0,011
11	5,585	6,921	3,212	1,491	0,692	0,321	0,149	0,069	0,032	0,015	0,013
12	5,827	7,220	3,350	1,556	0,722	0,335	0,156	0,072	0,033	0,016	0,013
13	5,947	7,369	3,420	1,588	0,737	0,342	0,159	0,074	0,034	0,016	0,014
14	6,038	7,482	3,472	1,612	0,748	0,347	0,161	0,075	0,035	0,016	0,014
15	6,068	7,520	3,489	1,620	0,752	0,349	0,162	0,075	0,035	0,016	0,014
16	6,098	7,557	3,506	1,628	0,756	0,351	0,163	0,076	0,035	0,016	0,014
17	6,098	7,557	3,506	1,628	0,756	0,351	0,163	0,076	0,035	0,030	--
18	6,129	7,594	3,524	1,636	0,759	0,352	0,164	0,076	0,066	--	--
19	6,129	7,594	3,524	1,636	0,759	0,352	0,164	0,142	--	--	--
20	6,129	7,594	3,524	1,636	0,759	0,352	0,306	--	--	--	--
21	6,129	7,594	3,524	1,636	0,759	0,658	--	--	--	--	--
22	6,129	7,594	3,524	1,636	1,417	--	--	--	--	--	--
23	6,129	7,594	3,524	3,053	--	--	--	--	--	--	--
24	6,129	7,594	6,577	--	--	--	--	--	--	--	--
25	6,129	14,171	--	--	--	--	--	--	--	--	--

i	$\mu_{e\,(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**										
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	0,942	0,839	0,660	0,511	0,384	0,283	0,200	0,142	0,099	0,068	0,036
2	0,938	0,822	0,636	0,478	0,352	0,249	0,176	0,123	0,084	0,057	0,033
3	0,930	0,789	0,593	0,437	0,309	0,219	0,152	0,104	0,071	0,048	0,032
4	0,917	0,778	0,573	0,405	0,287	0,200	0,137	0,092	0,064	0,043	0,028
5	0,912	0,761	0,538	0,381	0,266	0,182	0,123	0,084	0,058	0,039	0,018
6	0,909	0,743	0,525	0,366	0,251	0,164	0,116	0,079	0,054	0,037	0,015
7	0,909	0,743	0,518	0,355	0,240	0,164	0,112	0,076	0,052	0,035	0,011
8	0,909	0,733	0,501	0,339	0,232	0,158	0,107	0,073	0,050	0,034	0,007
9	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
10	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006

11	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
12	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
13	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
14	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
15	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
16	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,034	0,006
17	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,049	0,012	--
18	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,072	0,032	--	--
19	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,106	0,054	--	--	--
20	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,156	0,088	--	--	--	--
21	0,897	0,724	0,493	0,336	0,229	0,121	--	--	--	--	--
22	0,897	0,724	0,493	0,336	0,179	--	--	--	--	--	--
23	0,897	0,724	0,493	0,263	--	--	--	--	--	--	--
24	0,897	0,724	0,386	--	--	--	--	--	--	--	--
25	0,897	0,567	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Дейтерий (D)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,28	0,0000	0,11	1,17	0,46	0,59	0,80
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,70	0,0000	0,04	1,66	0,41	0,640,73	1,07
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,15	0,0000	0,00	2,15	0,33	0,77	1,50
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	2,60	0,0000	--	2,60	0,29	0,80	1,85
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,90	0,0000	--	2,90	0,26	0,82	2,23
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,10	0,0000	--	3,10	0,25	0,80	2,33
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,20	0,0000	--	3,20	0,26	0,79	2,41
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	3,30	0,0000	--	3,30	0,27	0,74	2,44
9	46,5–100 *кэв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,32	0,72	2,28
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
15	465–1000 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
16	215–465 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
17	100–215 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
18	46,5–100 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	3,40	0,0000	--	3,40	0,33	0,72	2,23
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	3,40	0,0001	--	3,40	0,33	0,72	2,23
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	3,40	0,0002	--	3,40	0,33	--	2,23
T	0,0252 *эв*	--	3,40	0,0006	--	3,40	0,33		--

$\sigma_{e\,(i,\,i+k)}$ при k, равном						$\mu_{e\,(i,\,i+k)}$ при k, равном					
i	0	1	2	3	4	i	0	1	2	3	4
1	0,37	0,45	0,10	0,11	0,14	1	0,89	0,67	0,22	–0,24	–0,65
2	0,59	0,55	0,17	0,19	0,16	2	0,87	0,59	0,14	–0,30	–0,70
3	0,65	0,65	0,33	0,44	0,08	3	0,86	0,55	0,03	–0,35	–0,75
4	0,75	0,72	0,62	0,48	0,03	4	0,85	0,51	–0,06	–0,40	–0,80
5	0,67	1,05	0,77	0,40	0,01	5	0,85	0,46	–0,14	–0,40	–0,90
6	0,77	1,22	0,78	0,33	0,00	6	0,82	0,42	–0,20	–0,65	--
7	0,84	1,29	0,80	0,27	--	7	0,81	0,42	–0,24	–0,70	--
8	0,86	1,43	0,81	0,20	--	8	0,80	0,40	–0,27	–0,75	--
9	1,12	1,43	0,69	0,16	--	9	0,78	0,38	–0,29	–0,80	--
10	1,16	1,43	0,67	0,14	--	10	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
11	1,16	1,43	0,67	0,14	--	11	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
12	1,16	1,43	0,67	0,14	--	12	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
13	1,16	1,43	0,67	0,14	--	13	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
14	1,16	1,43	0,67	0,14	--	14	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
15	1,16	1,43	0,67	0,14	--	15	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
16	1,16	1,43	0,67	0,14	--	16	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
17	1,16	1,43	0,67	0,14	--	17	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
18	1,16	1,43	0,67	0,14	--	18	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
19	1,16	1,43	0,67	0,14	--	19	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
20	1,16	1,43	0,67	0,14	--	20	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
21	1,16	1,43	0,67	0,14	--	21	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
22	1,16	1,43	0,67	0,14	--	22	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
23	1,16	1,43	0,67	0,14	--	23	0,78	0,38	–0,29	–0,85	--
24	1,16	1,43	0,80	--	--	24	0,78	0,38	–0,39	--	--
25	1,16	2,24	--	--	--	25	0,78	0,10	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ при k, равном						
i	0	1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,02	0,06	0,06	0,04	0,03	0,01
2	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ при k, равном						
i	0	1	2	3	4	5	6
1	--	0,85	0,75	0,65	0,55	0,40	0,40
2	--	--	0,80	0,70	0,60	0,50	--

Литий (Li^6)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,80	0,06	0,35	1,39	0,50	0,167	0,745	+0,10
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	2,00	0,10	0,25	1,65	0,40	0,200	0,875	–0,10
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	1,90	0,16	0,08	1,66	0,30	0,234	0,881	–0,25
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	1,40	0,25	--	1,15	0,18	0,274	0,553	–0,30
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	1,50	0,30	--	1,20	0,15	0,284	0,598	–0,35

6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,10	0,50	--	1,60	0,25	0,250	0,580	–0,20
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	6,70	2,00	--	4,70	0,20	0,267	1,820	–0,20
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	2,50	0,95	--	1,55	0,05	0,317	0,712	–0,30
9	46,5–100 *кэв*	0,77	1,60	0,70	--	0,90	0,07	0,310	0,362	–0,30
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	1,75	0,85	--	0,90	0,09	0,304	0,355	–0,30
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	2,10	1,20	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	2,70	1,80	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	3,50	2,60	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	4,80	3,90	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
15	465–1000 *эв*	0,77	6,60	5,70	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
16	215–465 *эв*	0,77	6,30	8,40	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
17	100–215 *эв*	0,77	12,9	12,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
18	46,5–100 *эв*	0,77	18,9	18,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	26,9	26,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	39,9	39,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	57,9	57,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	84,9	84,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	123,9	123,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	181,9	181,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	264,9	264,0	--	0,90	0,11	0,297	0,347	–0,25
T	0,0252 *эв*	--	945,9	945,0	--	0,90	0,11	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0,00	0,05	0,05	0,02	0,12	0,11
2	0,00	0,02	0,06	0,08	0,08	0,01
3	0,00	0,00	0,02	0,04	0,02	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	--	0,40	–0,10	0,40	0,30	0,00
2	--	0,40	0,20	0,20	0,10	0,10
3	--	--	0,40	0,25	0,00	--

Литий (Li^7)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,90	0,001	0,40	1,50	0,50	0,146	0,746	+0,10
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	2,40	0,000	0,30	2,10	0,40	0,175	1,00	–0,10
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,20	0,000	0,25	1,95	0,30	0,204	0,910	–0,25
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	1,70	0,000003	0,25	1,45	0,17	0,241	0,613	–0,30
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	1,50	0,000005	0,16	1,34	0,06	0,273	0,642	–0,40
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	1,20	0,000008	0,03	1,17	0,08	0,314	0,532	–0,50
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,80	0,000025	--	3,80	0,08	0,268	1,474	–0,30
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	1,20	0,000022	--	1,20	0,25	0,218	0,379	–0,15
9	46,5–100 *кэв*	0,77	1,05	0,000023	--	1,05	0,15	0,247	0,337	–0,20

10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	1,05	0,000030	--	1,05	0,10	0,262	0,357	–0,26
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	1,05	0,000044	--	1,05	0,10	0,262	0,357	–0,26
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	1,08	0,000065	--	1,08	0,10	0,262	0,367	–0,26
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	1,09	0,000095	--	1,09	0,10	0,262	0,371	–0,26
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	1,10	0,00014	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
15	465–1000 *эв*	0,77	1,10	0,00021	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
16	215–465 *эв*	0,77	1,10	0,00030	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
17	100–215 *эв*	0,77	1,10	0,00044	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
18	46,5–100 *эв*	0,77	1,10	0,00065	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	1,10	0,00095	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	1,10	0,0014	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	1,10	0,0021	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	1,10	0,0030	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	1,10	0,0044	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	1,11	0,0065	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	1,11	0,0095	--	1,10	0,10	0,262	0,374	–0,26
T	0,0252 *эв*	--	1,13	0,034	--	1,10	0,10	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0,02	0,11	0,05	0,10	0,09	0,03
2	0,04	0,16	0,03	0,01	0,04	0,02
3	0,03	0,20	0,02	--	--	--
4	0,03	0,17	0,05	--	--	--
5	0,00	0,09	0,07	--	--	--
6	0,00	0,00	0,03	--	--	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0,60	0,15	0,00	0,50	0,10	–0,20
2	0,50	0,10	–0,40	0,70	0,30	0,30
3	0,50	0,10	–0,30	--	--	--
4	0,40	0,15	–0,20	--	--	--
5	--	0,30	0,00	--	--	--
6	--	--	0,30	--	--	--

Бериллий (Be)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,70	0,030	0,55	1,12	0,64	0,081	0,373	+0,05
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,90	0,070	0,55	1,28	0,52	0,108	0,410	–0,10
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,70	0,095	0,40	2,20	0,28	0,162	0,832	–0,35
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	1,90	0,040	0,00	1,86	0,23	0,173	0,565	–0,25
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,20	0,003	--	3,20	0,23	0,173	0,971	–0,20
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,90	0,000	--	3,90	0,12	0,198	1,12	–0,25
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	4,20	0,000	--	4,20	0,10	0,202	1,23	–0,27

8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	5,10	0,000	--	5,10	0,09	0,204	1,51	–0,27
9	46,5–100 *кэв*	0,77	5,60	0,000	--	5,60	0,08	0,207	1,51	–0,28
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	5,80	0,000	--	5,80	0,07	0,209	1, 57	–0,28
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	5,90	0,000	--	5,90	0,07	0,209	1,60	–0,28
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
15	465–1000 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
16	215–465 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
17	100–215 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
18	46,5–100 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	6,00	0,000	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	6,00	0,001	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	6,00	0,001	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	6,00	0,002	--	6,00	0,07	0,209	1,63	–0,28
T	0,0252 *эв*	--	6,01	0,006	--	6,00	0,07	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0,00	0,13	0,39	0,21	0,17	0,20
2	0,00	0,07	0,36	0,34	0,31	0,02
3	0,00	0,02	0,22	0,45	0,09	0,02

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	--	0,50	0,30	0,00	0,20	–0,10
2	--	0,60	0,35	0,10	0,00	–0,30
3	--	0,70	0,50	0,10	0,10	0,00

	f_t **при** σ_o**, равной**				f_e **при** σ_o**, равной**			
i	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
3	1,00	0,99	0,97	0,95	1,00	1,00	0,98	0,97
4	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99
5	1,00	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99	0,98
6	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,99	0,98

Бор (B^{10})

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,50	0,15	0,30	1,05	0,51	0,098	0,403	+0,05
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,60	0,30	0,13	1,17	0,44	0,112	0,388	–0,10
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	1,90	0,25	0,06	1,59	0,36	0,128	0,483	–0,25
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	2,10	0,30	0,03	1,77	0,28	0,144	0,447	–0,15
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,50	0,22	0,00	2,28	0,20	0,160	0,640	–0,20

6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	4,10	0,50	--	3,60	0,08	0,184	0,960	–0,25
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	4,90	0,90	--	4,00	0,07	0,186	1,078	–0,28
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	4,80	1,60	--	3,2	0,07	0,186	0,863	–0,28
9	46,5–100 *кэв*	0,77	4,80	2,40	--	2,4	0,07	0,186	0,580	–0,28
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	5,60	3,60	--	2,0	0,07	0,186	0,483	–0,28
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	7,50	5,20	--	2,3	0,07	0,186	0,556	–0,28
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	10,3	7,70	--	2,6	0,07	0,186	0,628	–0,28
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	14,1	11,2	--	2,9	0,07	0,186	0,701	–0,28
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	19,7	16,6	--	3,10	0,07	0,186	0,749	–0,28
15	465–1000 *эв*	0,77	27,5	24,3	--	3,20	0,07	0,186	0,773	–0,28
16	215–465 *эв*	0,77	39,0	35,7	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
17	100–215 *эв*	0,77	55,8	52,5	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
18	46,5–100 *эв*	0,77	80,3	77,0	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	115	112	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	169	166	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	246	243	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	360	357	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	528	525	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	773	770	--	3,30	0,07	0,186	0,797	–0,28
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	1123	1120	--	3,30	0,07	0,186	--	–0,28
T	0,0252 *эв*	--	4020	4017	--	3,30	--	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0,00	0,03	0,07	0,11	0,06	0,03
2	0,01	0,03	0,04	0,04	0,01	--
3	0,00	0,04	0,01	0,01	--	--
4	0,00	0,03	--	--	--	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**					
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	--	0,20	0,20	0,00	0,30	0,00
2	--	0,10	0,10	0,20	0,10	--
3	--	0,10	0,30	0,00	--	--
4	--	0,10	--	--	--	--

f_c, f_t и $f_e \approx 1$ при любых σ_o.

Бор (B^{11})

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,50	0,01	0,40	1,09	0,51	0,0875	0,384	0,00
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,55	0,00	0,15	1,40	0,44	0,100	0,420	–0,15
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	1,65	0,00	0,03	1,62	0,31	0,123	0,473	–0,30
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	2,00	0,00	0,00	2,00	0,12	0,157	0,551	–0,30
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,20	0,00	--	2,20	0,12	0,157	0,606	–0,25
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,80	0,00	--	2,80	0,20	0,143	0,832	–0,20

7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,50	0,00	--	3,50	0,08	0,164	0,879	–0,29
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	3,70	0,00	--	3,70	0,08	0,164	0,819	–0,29
9	46,5–100 *кэв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,07	0,166	0,829	–0,29
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
15	465–1000 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
16	215–465 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
17	100–215 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
18	46,5–100 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	3,80	0,00	--	3,80	0,06	0,168	0,829	–0,29
T	0,0252 *эв*	--	3,80	0,00	--	3,80	0,06	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	0,00	0,01	0,07	0,12	0,10	0,07	0,03
2	0,00	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	--
3	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	--	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	--	0,40	0,30	0,10	0,10	0,00	–0,20
2	--	0,20	0,00	0,20	0,00	0,10	--
3	--	--	0,20	0,00	0,20	--	--

Углерод (C)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,20	0,002	0,35	0,85	0,35	0,109	0,351	0,00
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,45	0,000	0,08	1,37	0,18	0,138	0,544	–0,25
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,00	0,000	--	2,00	0,08	0,155	0,726	–0,40
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	1,80	0,000	--	1,80	0,11	0,150	0,474	–0,30
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,55	0,000	--	2,55	0,13	0,146	0,653	–0,25
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,10	0,000	--	3,10	0,12	0,148	0,665	–0,25
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	4,00	0,000	--	4,00	0,08	0,155	0,899	–0,30
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	4,30	0,000	--	4,30	0,07	0,156	0,972	–0,30
9	46,5–100 *кэв*	0,77	4,50	0,000	--	4,50	0,06	0,158	0,923	–0,29
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	4,60	0,000	--	4,60	0,06	0,158	0,944	–0,29

11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
15	465–1000 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
16	215–465 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
17	100–215 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
18	46,5–100 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	4,70	0,000	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	4,701	0,001	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	4,701	0,001	--	4,70	0,06	0,158	0,964	–0,29
T	0,0252 *эв*	--	4,704	0,004	--	4,70	0,06	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	0,00	0,00	0,07	0,20	0,05	0,02	0,01
2	0,00	0,00	0,00	0,05	0,02	0,01	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	--	--	0,40	0,10	0,00	0,20	0,00
2	--	--	--	0,30	0,10	0,10	--

	f_t **при** σ_o**, равной**				f_e **при** σ_o**, равной**			
i	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
1	1,00	0,99	0,88	0,81	1,00	0,99	0,94	0,89
2	1,00	0,99	0,90	0,85	1,00	0,99	0,95	0,91
3	1,00	1,00	0,96	0,94	1,00	1,00	0,98	0,96

Азот (N)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,40	0,250	0,35	0,80	0,35	0,093	0,295	0,00
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,60	0,220	0,15	1,23	0,25	0,107	0,392	–0,25
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	1,65	0,200	0,00	1,45	0,21	0,113	0,389	–0,35
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	1,95	0,085	--	1,86	0,13	0,124	0,405	–0,30
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	1,82	0,030	--	1,79	0,06	0,135	0,424	–0,30
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,30	0,045	--	2,25	0,05	0,136	0,443	–0,30
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,20	0,0016	--	3,20	0,05	0,136	0,631	–0,30
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	4,10	0,0015	--	4,10	0,05	0,136	0,808	–0,30
9	46,5–100 *кэв*	0,77	5,00	0,0015	--	5,00	0,05	0,136	0,883	–0,30
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	6,10	0,0017	--	6,10	0,05	0,136	1,08	–0,30
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	7,20	0,0024	--	7,20	0,05	0,136	1,27	–0,30

12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	8,30	0,0035	--	8,30	0,05	0,136	1,47	–0,30
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	8,80	0,0052	--	8,79	0,05	0,136	1,55	–0,30
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	9,10	0,0078	--	9,09	0,05	0,136	1,61	–0,30
15	465–1000 *эв*	0,77	9,40	0,011	--	9,39	0,05	0,136	1,66	–0,30
16	215–465 *эв*	0,77	9,50	0,017	--	9,48	0,05	0,136	1,68	–0,30
17	100–215 *эв*	0,77	9,62	0,024	--	9,60	0,05	0,136	1,70	–0,30
18	46,5–100 *эв*	0,77	9,74	0,035	--	9,70	0,05	0,136	1,71	–0,30
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	9,85	0,052	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	9,88	0,077	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	9,91	0,112	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	9,97	0,165	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	10,0	0,242	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	10,2	0,354	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	10,3	0,520	--	9,80	0,05	0,136	1,73	–0,30
T	0,0252 *эв*	--	11,6	1,850	--	9,80	0,05	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	0,00	0,02	0,08	0,11	0,07	0,05	0,02
2	0,00	0,00	0,01	0,05	0,06	0,03	--

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	--	0,50	0,20	0,00	0,10	0,20	0,00
2	--	--	0,40	0,10	0,20	0,10	--

	f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_0**, равной**			
i	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
2	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	1,00	0,99
3	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	0,97	0,95	1,00	1,00	0,99	0,97
5	1,00	0,98	0,91	0,87	1,00	0,99	0,95	0,93
6	1,00	0,98	0,94	0,92	1,00	0,99	0,97	0,96

Кислород (O)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$	$\mu_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,15	0,230	0,16	0,76	0,35	0,081	0,252	0,05
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	1,45	0,075	0,00	1,38	0,26	0,092	0,385	–0,30
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	1,90	0,003	--	1,90	0,26	0,092	0,419	–0,30
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	1,75	0,000	--	1,75	0,15	0,106	0,325	–0,40
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	4,30	0,000	--	4,30	0,08	0,115	0,868	–0,50
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	5,60	0,000	--	5,60	0,23	0,096	0,779	–0,20
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,80	0,000	--	3,80	0,03	0,125	0,688	–0,40
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	3,50	0,000	--	3,50	0,04	0,120	0,609	–0,31
9	46,5–100 *кэв*	0,77	3,55	0,000	--	3,55	0,04	0,120	0,553	–0,31
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	3,60	0,000	--	3,60	0,04	0,120	0,561	–0,31

11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	3,65	0,000	--	3,65	0,04	0,120	0,569	–0,31
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	3,70	0,000	--	3,70	0,04	0,120	0,577	–0,31
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
15	465–1000 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
16	215–465 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
17	100–215 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
18	46,5–100 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	3,75	0,000	--	3,75	0,04	0,120	0,584	–0,31
T	0,0252 *эв*	--	3,75	0,000	--	3,75	0,04	--	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	0,00	0,00	0,02	0,05	0,05	0,03	0,01

	$\mu_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**						
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	--	--	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

	f_c **при** σ_o**, равной**				f_t **при** σ_o**, равной**				f_e **при** σ_o**, равной**			
i	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
1	1,00	0,99	0,90	0,85	1,00	0,97	0,90	0,84	1,00	0,98	0,95	0,90
2	1,00	0,98	0,88	0,80	1,00	0,96	0,88	0,78	1,00	0,98	0,93	0,89
3	--	--	--	--	1,00	0,94	0,82	0,70	1,00	0,97	0,88	0,82
4	--	--	--	--	1,00	0,93	0,74	0,30	1,00	0,98	0,89	0,72
5	--	--	--	--	1,00	0,94	0,89	0,86	1,00	0,98	0,94	0,92
6	--	--	--	--	1,00	0,83	0,75	0,70	1,00	0,89	0,81	0,78
7	--	--	--	--	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Натрий (Na)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	2,20	0,050	0,65	1,50	0,60	0,0348	0,244
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	2,30	0,005	0,65	1,64	0,50	0,0436	0,230
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,60	0,0002	0,65	1,95	0,40	0,0523	0,248
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,00	0,0002	0,58	2,42	0,34	0,0575	0,244
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,80	0,0002	0,48	3,32	0,31	0,0600	0,350
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	4,50	0,0003	0,13	4,37	0,08	0,0800	0,510

7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	4,00	0,0006	0,00	4,00	0,06	0,0820	0,475
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	3,80	0,0012	--	3,80	0,04	0,0836	0,460
9	46,5–100 *кэв*	0,77	5,30	0,0016	--	5,30	0,03	0,0845	0,582
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	4,30	0,0026	--	4,30	0,03	0,0845	0,472
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	5,00	0,001	--	5,00	0,03	0,0845	0,549
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	8,00	0,001	--	8,00	0,03	0,0845	0,878
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	100,1	0,100	--	100,0	0,03	0,0845	10,97
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	6,21	0,010	--	6,20	0,03	0,0845	0,680
15	465–1000 *эв*	0,77	3,30	0,005	--	3,30	0,03	0,0845	0,362
16	215–465 *эв*	0,77	3,11	0,006	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
17	100–215 *эв*	0,77	3,11	0,007	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
18	46,5–100 *эв*	0,77	3,11	0,010	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	3,12	0,015	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	3,12	0,022	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	3,13	0,032	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	3,15	0,046	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	3,17	0,068	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	3,20	0,101	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	3,25	0,147	--	3,10	0,03	0,0845	0,340
T	0,0252 *эв*	--	3,63	0,525	--	3,10	0,03	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,01	0,05	0,12	0,20	0,15	0,08	0,03	0,01
2	0,09	0,13	0,17	0,13	0,09	0,03	0,01	--
3	0,22	0,20	0,09	0,09	0,04	0,01	--	--
4	0,30	0,27	0,00	0,01	--	--	--	--
5	0,11	0,34	0,03	--	--	--	--	--
6	0,00	0,09	0,03	0,01	--	--	--	--

	f_c **при** σ_o**, равной**					f_t **при** σ_o**, равной**				f_e **при** σ_o**, равной**			
i	∞	10^3	10^2	10	**0**	∞	10^2	**10**	**0**	∞	10^2	**10**	**0**
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,92	0,77	1,00	0,99	0,94	0,87
7	1,00	1,00	0,98	0,88	0,75	1,00	0,99	0,92	0,81	1,00	0,99	0,95	0,90
8	1,00	1,00	0,98	0,85	0,70	1,00	0,99	0,93	0,86	1,00	0,99	0,94	0,90
9	1,00	0,99	0,94	0,79	0,64	1,00	0,94	0,76	0,67	1,00	0,96	0,82	0,72
10	1,00	0,98	0,84	0,52	0,36	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,92	0,80	1,00	0,99	0,95	0,90
13	1,00	0,87	0,56	0,31	0,26	1,00	0,51	0,38	0,33	1,00	0,67	0,46	0,40
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,91	0,79	1,00	0,98	0,94	0,88

Магний (Mg)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,70	0,060	0,84	0,80	0,62	0,0318	0,120
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	2,10	0,003	0,85	1,25	0,53	0,0393	0,159
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,10	0,0002	0,75	1,35	0,42	0,0485	0,160
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	2,60	0,0002	0,40	2,20	0,30	0,0585	0,226
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,20	0,0003	0,01	3,19	0,35	0,0544	0,304
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	5,00	0,0004	--	5,00	0,34	0,0552	0,400
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	8,00	0,0004	--	8,00	0,14	0,0719	0,834
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	4,70	0,0003	--	4,70	0,04	0,0803	0,547
9	46,5–100 *кэв*	0,77	8,50	0,0040	--	8,50	0,03	0,0811	0,895
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	4,00	0,0005	--	4,00	0,03	0,0811	0,421
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	4,00	0,0005	--	4,00	0,03	0,0811	0,421
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	3,50	0,0001	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	3,50	0,0002	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	3,50	0,0003	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
15	465–1000 *эв*	0,77	3,50	0,0004	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
16	215–465 *эв*	0,77	3,50	0,0006	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
17	100–215 *эв*	0,77	3,50	0,0009	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
18	46,5–100 *эв*	0,77	3,50	0,0013	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	3,50	0,0019	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	3,50	0,0028	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	3,50	0,0042	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	3,51	0,0061	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	3,51	0,009	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	3,51	0,013	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	3,52	0,019	--	3,50	0,03	0,0811	0,369
T	0,0252 *эв*	--	3,57	0,069	--	3,50	0,03	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,01	0,20	0,14	0,20	0,16	0,09	0,03	0,01
2	0,11	0,41	0,13	0,10	0,06	0,03	0,01	--
3	0,06	0,39	0,27	0,03	--	--	--	--
4	0,01	0,15	0,17	0,06	0,01	--	--	--
5	0,00	0,01	--	--	--	--	--	--

	f_c **при** σ_o**, равной**					f_t **при** σ_o**, равной**				f_e **при** σ_o**, равной**			
i	10^3	10^2	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
6	1,00	1,00	1,00	--	--	1,00	0,89	--	--	1,00	0,93	--	--
7	1,00	1,00	1,00	--	--	1,00	0,96	--	--	1,00	0,97	--	--
8	1,00	1,00	1,00	--	--	1,00	1,00	--	--	1,00	1,00	--	--
9	0,98	0,85	0,59	--	--	1,00	0,69	--	--	1,00	0,82	--	--
10	1,00	0,97	0,81	--	--	1,00	0,96	--	--	1,00	0,98	--	--
11	1,00	0,97	0,81	--	--	1,00	0,96	--	--	1,00	0,98	--	--

Алюминий (Al)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,90	0,095	0,80	1,00	0,64	0,0266	0,127
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	2,20	0,023	0,75	1,43	0,57	0,0317	0,148
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,70	0,002	0,65	2,05	0,47	0,0391	0,196
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,00	0,0004	0,50	2,50	0,36	0,0472	0,207
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,20	0,0004	0,13	3,07	0,29	0,0524	0,282
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	4,00	0,0007	--	4,00	0,20	0,0590	0,342
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,90	0,001	--	3,90	0,11	0,0657	0,371
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	5,20	0,003	--	5,20	0,06	0,0694	0,523
9	46,5–100 *кэв*	0,77	5,00	0,002	--	5,00	0,04	0,0708	0,460
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	7,40	0,006	--	7,39	0,03	0,0716	0,687
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	1,00	0,001	--	1,00	0,02	0,0723	0,094
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	2,60	0,0060	--	2,54	0,02	0,0723	0,238
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	1,40	0,0007	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	1,40	0,0010	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
15	465–1000 *эв*	0,77	1,40	0,0015	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
16	215–465 *эв*	0,77	1,40	0,0021	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
17	100–215 *эв*	0,77	1,40	0,0031	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
18	46,5–100 *эв*	0,77	1,40	0,0046	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	1,41	0,0067	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	1,41	0,010	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	1,42	0,015	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	1,42	0,021	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	1,43	0,031	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	1,45	0,046	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	1,47	0,067	--	1,40	0,02	0,0723	0,131
T	0,0252 *эв*	--	1,64	0,241	--	1,40	0,02	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**								
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,01	0,06	0,15	0,25	0,18	0,10	0,04	0,01	--
2	0,05	0,26	0,22	0,11	0,07	0,03	0,01	--	--
3	0,06	0,31	0,13	0,10	0,04	0,01	--	--	--
4	0,04	0,27	0,19	--	--	--	--	--	--
5	0,00	0,03	0,06	0,03	0,01	--	--	--	--

	f_c **при** σ_o**, равной**				f_t **при** σ_o**, равной**				f_e **при** σ_o**, равной**				
i	10^3	10^2	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,95	1,00	1,00	0,99	0,98
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,92	0,85	1,00	1,00	0,96	0,93
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,81	0,65	1,00	0,98	0,93	0,81
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84	0,76	0,68	1,00	0,96	0,88	0,84
8	1,00	0,98	0,90	0,83	0,80	1,00	0,81	0,59	0,51	1,00	0,90	0,76	0,71

9	1,00	0,95	0,70	0,50	0,40	1,00	0,63	0,41	0,37	1,00	0,78	0,57	0,52
10	0,98	0,87	0,56	0,33	0,23	1,00	0,40	0,14	0,10	1,00	0,61	0,31	0,20
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	0,92	0,60	0,25	0,12	0,09	1,00	0,57	0,54	0,53	1,00	0,62	0,56	0,54

Кремний (Si)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	1,80	0,30	0,60	0,90	0,65	0,0249	0,108
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	2,20	0,03	0,85	1,32	0,60	0,0285	0,123
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	2,60	0,00	0,60	2,00	0,52	0,0342	0,167
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,00	0,00	0,12	2,88	0,28	0,0513	0,259
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,20	0,00	0,00	3,20	0,28	0,0513	0,288
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,50	0,00	--	3,50	0,14	0,0612	0,310
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	5,30	0,00	--	5,30	0,07	0,0662	0,508
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	2,70	0,00	--	2,70	0,05	0,0677	0,265
9	46,5–100 *кэв*	0,77	2,01	0,01	--	2,00	0,03	0,0691	0,179
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	1,61	0,01	--	1,60	0,02	0,0698	0,145
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	1,80	0,00	--	1,80	0,02	0,0698	0,163
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	2,50	0,00	--	2,50	0,02	0,0698	0,227
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	2,50	0,00	--	2,50	0,02	0,0698	0,227
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	2,50	0,00	--	2,50	0,02	0,0698	0,227
15	465–1000 *эв*	0,77	2,30	0,00	--	2,30	0,02	0,0698	0,208
16	215–465 *эв*	0,77	2,20	0,00	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
17	100–215 *эв*	0,77	2,20	0,00	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
18	46,5–100 *эв*	0,77	2,20	0,00	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	2,20	0,00	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	2,21	0,01	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	2,21	0,01	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	2,22	0,02	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	2,22	0,02	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	2,23	0,03	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	2,25	0,05	--	2,20	0,02	0,0698	0,199
T	0,0252 *эв*	--	2,36	0,16	--	2,20	0,02	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,01	0,05	0,11	0,18	0,13	0,08	0,03	0,01
2	0,05	0,42	0,21	0,08	0,05	0,03	0,01	--
3	0,00	0,30	0,26	0,04	0,00	0,00	--	--
4	0,00	0,00	0,08	0,03	0,01	--	--	--

f_c, f_t и $f_e \approx 1$ при $\sigma_o > 20$ *барн*.

Калий (K)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	2,70	0,330	0,80	1,57	0,63	0,0190	0,146
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,20	0,240	0,50	2,46	0,53	0,0242	0,196
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	3,50	0,150	0,16	3,19	0,40	0,0308	0,241
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,10	0,065	0,01	3,02	0,30	0,0360	0,191
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,10	0,025	--	2,08	0,28	0,0370	0,135
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,10	0,003	--	2,10	0,26	0,0380	0,116
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	2,30	0,004	--	2,30	0,14	0,0442	0,147
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	2,60	0,006	--	2,59	0,10	0,0463	0,174
9	46,5–100 *кэв*	0,77	3,00	0,009	--	2,99	0,06	0,0483	0,188
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	2,80	0,014	--	2,79	0,04	0,0494	0,179
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	2,00	0,005	--	2,00	0,03	0,0499	0,130
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	3,70	0,0033	--	3,67	0,02	0,0504	0,240
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	4,40	0,200	--	4,20	0,02	0,0504	0,275
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	2,01	0,009	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
15	465–1000 *эв*	0,77	2,01	0,013	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
16	215–465 *эв*	0,77	2,02	0,018	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
17	100–215 *эв*	0,77	2,03	0,027	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
18	46,5–100 *эв*	0,77	2,04	0,040	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	2,06	0,058	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	2,08	0,085	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	2,13	0,130	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	2,18	0,180	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	2,27	0,270	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	2,40	0,400	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	2,58	0,580	--	2,00	0,02	0,0504	0,131
T	0,0252 *эв*	--	4,07	2,070	--	2,00	0,02	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,00	0,06	0,15	0,25	0,19	0,10	0,04	0,01
2	0,00	0,04	0,16	0,15	0,10	0,04	0,01	--
3	0,00	0,00	0,08	0,06	0,02	--	--	--
4	0,00	0,01	--	--	--	--	--	--

	f_c **при** σ_0**, равной**					f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_0**, равной**			
i	∞	10^3	10^2	10	0	∞	10^2	10	0	∞	10^2	10	0
8	1,00	1,00	0,98	0,88	--	1,00	0,99	0,93	--	1,00	1,00	0,95	--
9	1,00	0,99	0,94	0,72	--	1,00	0,97	0,84	--	1,00	0,98	0,86	--
10	1,00	0,99	0,90	0,60	--	1,00	0,97	0,75	--	1,00	0,98	0,83	--
11	1,00	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--
12	1,00	0,95	0,71	0,38	--	1,00	0,77	0,61	--	1,00	0,84	0,67	--
13	1,00	0,86	0,48	0,19	--	1,00	0,62	0,50	--	1,00	0,72	0,55	--

Кальций (Ca)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	2,80	0,02	1,15	1,63	0,63	0,0186	0,148
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,50	0,01	0,76	2,73	0,53	0,0236	0,212
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	3,70	0,00	0,05	3,65	0,40	0,0301	0,269
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	2,90	0,00	--	2,90	0,28	0,0362	0,184
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,20	0,00	--	3,20	0,18	0,0412	0,231
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,90	0,00	--	2,90	0,17	0,0417	0,175
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	2,90	0,00	--	2,90	0,09	0,0457	0,192
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	2,00	0,00	--	2,00	0,03	0,0487	0,141
9	46,5–100 *кэв*	0,77	1,50	0,01	--	1,50	0,02	0,0492	0,096
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	1,50	0,01	--	1,50	0,02	0,0492	0,096
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	1,50	0,00	--	1,50	0,02	0,0492	0,096
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	1,90	0,00	--	1,90	0,02	0,0492	0,121
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	2,50	0,00	--	2,50	0,02	0,0492	0,160
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	2,90	0,00	--	2,90	0,02	0,0492	0,185
15	465–1000 *эв*	0,77	3,00	0,00	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
16	215–465 *эв*	0,77	3,00	0,00	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
17	100–215 *эв*	0,77	3,00	0,00	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
18	46,5–100 *эв*	0,77	3,01	0,01	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	3,01	0,01	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	3,02	0,02	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	3,03	0,03	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	3,04	0,04	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	3,06	0,06	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	3,08	0,08	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	3,12	0,12	--	3,00	0,02	0,0492	0,192
T	0,0252 *эв*	--	3,44	0,44	--	3,00	0,02	--	--

i	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,00	0,03	0,21	0,36	0,29	0,18	0,06	0,02
2	0,00	0,02	0,17	0,26	0,21	0,08	0,02	--
3	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	--	--

f_c, f_t и $f_e \approx 1$ при $\sigma_o > 20$ *барн*

Титан (Ti)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	3,00	0,065	1,20	1,74	0,74	0,0108	0,094
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,40	0,023	1,15	2,24	0,66	0,0141	0,105
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	3,70	0,002	1,00	2,70	0,55	0,0187	0,124
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,50	0,0004	0,55	2,95	0,40	0,0249	0,129
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,10	0,0004	0,15	2,95	0,21	0,0328	0,170
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,70	0,0007	0,02	2,68	0,15	0,0353	0,137
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	2,70	0,001	--	2,70	0,07	0,0386	0,151
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	3,10	0,003	--	3,10	0,03	0,0403	0,181
9	46,5–100 *кэв*	0,77	8,90	0,002	--	8,89	0,02	0,0407	0,470
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	26,0	0,006	--	26,0	0,01	0,0411	1,39
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	61,0	0,001	--	61,0	0,01	0,0411	3,26
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	16,0	0,0060	--	16,0	0,01	0,0411	0,854
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	24,0	0,0007	--	23,4	0,01	0,0411	1,25
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	4,63	0,0010	--	4,60	0,01	0,0411	0,246
15	465–1000 *эв*	0,77	4,34	0,0015	--	4,30	0,01	0,0411	0,230
16	215–465 *эв*	0,77	4,25	0,0021	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
17	100–215 *эв*	0,77	4,28	0,0031	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
18	46,5–100 *эв*	0,77	4,31	0,0046	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	4,36	0,0067	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	4,44	0,010	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	4,55	0,015	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	4,71	0,021	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	4,96	0,031	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	5,31	0,046	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	5,82	0,067	--	4,20	0,01	0,0411	0,224
T	0,0252 *эв*	--	10,0	0,241	--	4,20	0,01	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,01	0,07	0,21	0,36	0,29	0,18	0,06	0,02
2	0,05	0,26	0,28	0,27	0,18	0,07	0,03	0,01
3	0,20	0,65	0,11	0,03	0,01	--	--	--
4	0,03	0,34	0,16	0,02	--	--	--	--
5	0,00	0,01	0,08	0,04	0,02	--	--	--
6	0,01	0,01	--	--	--	--	--	--

	f_c **при** σ_0**, равной**					f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_0**, равной**			
i	∞	10^3	10^2	**10**	**0**	∞	10^2	**10**	**0**	∞	10^2	**10**	**0**
8	1,00	0,99	0,92	0,80	--	1,00	0,99	0,89	--	1,00	1,00	0,91	--
9	1,00	1,00	0,94	0,75	--	1,00	0,92	0,63	--	1,00	0,95	0,84	--
10	1,00	0,98	0,86	0,70	--	1,00	0,80	0,40	--	1,00	0,90	0,64	--
11	1,00	0,98	0,91	0,80	--	1,00	0,85	0,69	--	1,00	0,93	0,83	--
12	1,00	0,99	0,94	0,80	--	1,00	0,97	0,83	--	1,00	0,99	0,89	--
13	1,00	0,84	0,46	0,29	--	1,00	0,49	0,24	--	1,00	0,62	0,39	--

Ванадий (V)

i	E_n	Δu	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	3,20	0,010	1,25	1,94	0,71	0,0113	0,110
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,70	0,002	1,20	2,50	0,62	0,0148	0,123
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	4,00	0,001	1,10	2,90	0,50	0,0195	0,137
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,70	0,001	0,86	2,84	0,36	0,0250	0,125
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,20	0,002	0,55	2,65	0,18	0,0321	0,149
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,40	0,002	0,24	3,16	0,16	0,0328	0,150
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	5,30	0,004	0,02	5,28	0,07	0,0364	0,278
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	6,00	0,007	--	5,99	0,03	0,0379	0,329
9	46,5–100 *кэв*	0,77	7,00	0,013	--	6,99	0,02	0,0383	0,347
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	12,0	0,025	--	12,0	0,01	0,0387	0,603
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	49,0	0,060	--	48,9	0,01	0,0387	2,46
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	62,0	0,160	--	61,8	0,01	0,0387	3,11
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	62,0	0,260	--	61,7	0,01	0,0387	3,09
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	8,00	0,035	--	7,96	0,01	0,0387	4,00
15	465–1000 *эв*	0,77	6,30	0,030	--	6,27	0,01	0,0387	0,315
16	215–465 *эв*	0,77	6,00	0,044	--	5,96	0,01	0,0387	0,299
17	100–215 *эв*	0,77	6,46	0,340	--	6,12	0,01	0,0387	0,307
18	46,5–100 *эв*	0,77	5,50	0,096	--	5,40	0,01	0,0387	0,271
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	5,30	0,140	--	5,16	0,01	0,0387	0,259
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	5,11	0,206	--	4,90	0,01	0,0387	0,246
21	4,65–10,0 *эв*	0,77	5,20	0,303	--	4,90	0,01	0,0387	0,246
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	5,34	0,442	--	4,90	0,01	0,0387	0,246
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	5,55	0,652	--	4,90	0,01	0,0387	0,246
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	5,86	0,958	--	4,90	0,01	0,0387	0,246
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	6,30	1,400	--	4,90	0,01	0,0387	0,246
T	0,0252 *эв*	--	9,90	5,000	--	4,90	0,01	--	--

	$\sigma_{in\,(i,\,i+k)}$ **при** k**, равном**							
i	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	0,01	0,08	0,21	0,38	0,30	0,19	0,06	0,02
2	0,05	0,18	0,36	0,31	0,21	0,07	0,02	0,00
3	0,17	0,37	0,25	0,19	0,08	0,03	0,01	--
4	0,35	0,34	0,13	0,03	0,01	--	--	--
5	0,20	0,28	0,05	0,02	--	--	--	--
6	0,06	0,12	0,06	--	--	--	--	--
7	0,00	0,00	0,02	--	--	--	--	--

	f_c **при** σ_0**, равной**					f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_0**, равной**			
i	∞	10^3	10^2	**10**	**0**	∞	10^2	**10**	**0**	∞	10^2	**10**	**0**
9	1,00	0,99	0,92	0,67	--	1,00	0,96	0,83	--	1,00	0,98	0,90	--
10	1,00	0,98	0,84	0,55	--	1,00	0,97	0,87	--	1,00	0,98	0,96	--
11	1,00	0,97	0,87	0,70	--	1,00	0,81	0,54	--	1,00	0,90	0,74	--
12	1,00	0,93	0,85	0,65	--	1,00	0,75	0,43	--	1,00	0,87	0,67	--
13	1,00	0,90	0,61	0,35	--	1,00	0,37	0,26	--	1,00	0,63	0,39	--

14	1,00	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--
15	1,00	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--
16	1,00	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--	1,00	1,00	1,00	--
17	1,00	1,00	0,96	0,79	--	1,00	0,98	0,97	--	1,00	0,99	0,98	--

Хром (Cr)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	3,30	0,035	1,30	1,97	0,80	0,0078	0,077
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,60	0,003	1,25	2,35	0,67	0,0128	0,098
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	3,80	0,003	1,10	2,70	0,45	0,0214	0,142
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,10	0,003	0,73	2,37	0,32	0,0264	0,110
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,80	0,004	0,04	2,76	0,19	0,0315	0,152
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	2,90	0,004	–	2,90	0,16	0,0327	0,136
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	2,60	0,005	–	2,60	0,11	0,0346	0,129
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	5,80	0,006	–	5,79	0,06	0,0366	0,307
9	46,5–100 *кэв*	0,77	6,40	0,008	–	6,39	0,03	0,0377	0,313
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	2,90	0,010	–	2,89	0,02	0,0381	0,143
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	4,40	0,013	–	4,39	0,01	0,0385	0,220
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	18,0	0,020	–	18,0	0,01	0,0385	0,900
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	11,0	0,030	–	11,0	0,01	0,0385	0,550
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	4,70	0,050	–	4,65	0,01	0,0385	0,233
15	465–1000 *эв*	0,77	4,70	0,080	–	4,62	0,01	0,0385	0,231
16	215–465 *эв*	0,77	4,23	0,030	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
17	100–215 *эв*	0,77	4,24	0,041	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
18	46,5–100 *эв*	0,77	4,26	0,060	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	4,29	0,087	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	4,33	0,129	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
21	4,65–10 *эв*	0,77	4,39	0,189	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	4,48	0,280	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	4,61	0,410	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	4,80	0,600	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	5,07	0,870	–	4,20	0,01	0,0385	0,210
T	0,0252 *эв*	–	7,30	3,100	–	4,20	0,01	–	–

i	$\sigma_{in(i, i+k)}$ при *k*, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,01	0,08	0,22	0,39	0,30	0,19	0,07	0,03	0,01
2	0,07	0,40	0,29	0,24	0,16	0,06	0,02	0,01	–
3	0,02	0,29	0,68	0,07	0,03	0,01	–	–	–
4	0,01	0,24	0,3	0,13	0,04	0,01	–	–	–
5	0,01	0,02	0,01	–	–	–	–	–	–

i	f_c при σ_0, равной					f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
	∞	**103**	**102**	**10**	**0**	∞	**102**	**10**	**0**	∞	**102**	**10**	**0**
8	1,00	1,00	0,98	0,80	–	1,00	0,97	0,87	–	1,00	0,98	0,93	–
9	1,00	1,00	0,98	0,78	–	1,00	0,89	0,56	–	1,00	0,94	0,72	–

10	1,00	1,00	0,98	0,71	–	1,00	1,00	0,96	–	1,00	1,00	0,98	–
11	1,00	1,00	0,96	0,62	–	1,00	1,00	0,93	–	1,00	1,00	0,96	–
12	1,00	1,00	0,97	0,82	–	1,00	0,97	0,92	–	1,00	0,98	0,95	–
13	1,00	0,98	0,91	0,76	–	1,00	0,94	0,73	–	1,00	0,97	0,84	–
14	1,00	0,96	0,75	0,40	–	1,00	1,0	1,0	–	1,00	1,0	1,0	–
15	1,00	0,93	0,81	0,30	–	1,00	1,0	1,0	–	1,00	1,0	1,0	–

Железо (Fe)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	3,40	0,036	1,37	1,99	0,83	0,0061	0,061
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,80	0,005	1,35	2,45	0,72	0,0100	0,082
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	3,50	0,002	1,13	2,37	0,45	0,0196	0,114
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,30	0,003	0,90	2,40	0,32	0,0242	0,102
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	2,90	0,004	0,37	2,53	0,24	0,0271	0,120
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,80	0,005	0,01	3,78	0,17	0,0296	0,162
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	3,00	0,006	–	2,99	0,08	0,0328	0,142
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	3,70	0,006	–	3,69	0,05	0,0339	0,181
9	46,5–100 *кэв*	0,77	5,30	0,007	–	5,29	0,03	0,0346	0,238
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	14,5	0,017	–	14,5	0,02	0,0349	0,657
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	4,00	0,005	–	3,99	0,01	0,0353	0,183
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	8,40	0,004	–	8,40	0,01	0,0353	0,385
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	5,90	0,011	–	5,89	0,01	0,0353	0,270
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	7,50	0,106	–	7,39	0,01	0,0353	0,339
15	465–1000 *эв*	0,77	10,0	0,015	–	10,0	0,01	0,0353	0,459
16	215–465 *эв*	0,77	11,0	0,028	–	11,0	0,01	0,0353	0,504
17	100–215 *эв*	0,77	11,4	0,037	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
18	46,5–100 *эв*	0,77	11,5	0,053	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	11,5	0,072	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	11,5	0,105	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
21	4,65–10 *эв*	0,77	11,6	0,154	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	11,6	0,220	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	11,7	0,330	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	11,9	0,490	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	12,1	0,720	–	11,4	0,01	0,0353	0,523
T	0,0252 *эв*	–	13,9	2,530	–	11,4	0,01	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при *k*, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,01	0,08	0,19	0,40	0,34	0,22	0,08	0,04	0,01
2	0,12	0,22	0,31	0,33	0,23	0,10	0,03	0,01	–
3	0,18	0,60	0,14	0,13	0,05	0,03	–	–	–
4	0,15	0,46	0,25	0,03	0,01	–	–	–	–
5	0,01	0,15	0,15	0,05	0,01	–	–	–	–
6	0,1	–	–	–	–	–	–	–	–

i	f_c при σ_0, равной					f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
	∞	102	10	1	0	∞	10	1	0	∞	10	1	0
2	1,00	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	0,99	0,98	0,96	1,00	1,00	0,99	0,98
3	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	1,00	0,98	0,95	0,94	1,00	0,99	0,97	0,96
4	1,00	1,00	0,98	0,92	0,90	1,00	0,94	0,81	0,74	1,00	0,97	0,90	0,87
5	1,00	0,99	0,92	0,83	0,79	1,00	0,91	0,73	0,61	1,00	0,95	0,86	0,79
6	1,00	0,98	0,82	0,70	0,63	1,00	0,82	0,59	0,45	1,00	0,9	0,75	0,68
7	1,00	0,98	0,82	0,69	0,62	1,00	0,92	0,71	0,55	1,00	0,96	0,85	0,77
8	1,00	0,97	0,79	0,55	0,50	1,00	0,85	0,57	0,39	1,00	0,92	0,76	0,66
9	1,00	0,90	0,70	0,57	0,53	1,00	0,77	0,49	0,34	1,00	0,86	0,70	0,60
10	1,00	0,66	0,52	0,32	0,39	1,00	0,25	0,07	0,03	1,00	0,37	0,15	0,07
11	1,00	0,98	0,88	0,80	0,75	1,00	1,00	1,0	1,0	1,00	1,00	1,0	1,0
12	1,00	0,95	0,76	0,64	0,60	1,00	0,98	0,95	0,86	1,00	0,97	0,84	0,76
13	1,00	0,98	0,88	0,80	0,77	1,00	1,00	1,0	1,0	1,00	1,00	1,0	1,0
14	1,00	0,78	0,49	0,39	0,37	1,00	1,00	1,0	1,0	1,00	1,00	1,0	1,0

Никель (Ni)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	3,50	0,230	1,27	2,00	0,80	0,0068	0,069
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,60	0,190	1,30	2,11	0,73	0,0091	0,064
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	3,30	0,135	1,00	2,16	0,45	0,0186	0,099
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	3,10	0,072	0,50	2,53	0,30	0,0186	0,105
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	3,15	0,030	–	3,12	0,14	0,0237	0,159
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	3,95	0,011	–	3,94	0,14	0,0291	0,166
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	5,50	0,009	–	5,49	0,09	0,0291	0,245
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	4,60	0,010	–	4,59	0,04	0,0308	0,216
9	46,5–100 *кэв*	0,77	7,50	0,016	–	7,48	0,03	0,0325	0,319
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	10,9	0,016	–	10,9	0,01	0,0335	0,474
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	28,7	0,033	–	28,7	0,01	0,0335	1,25
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	14,0	0,018	–	14,0	0,01	0,0335	0,609
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	20,0	0,048	–	20,0	0,01	0,0335	0,807
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	13,4	0,019	–	13,4	0,01	0,0335	0,583
15	465–1000 *эв*	0,77	15,5	0,028	–	13,5	0,01	0,0335	0,674
16	215–465 *эв*	0,77	17,0	0,041	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
17	100–215 *эв*	0,77	17,1	0,061	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
18	46,5–100 *эв*	0,77	17,1	0,089	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	17,1	0,131	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	17,2	0,193	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
21	4,65–10 *эв*	0,77	17,3	0,283	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	17,4	0,414	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	17,6	0,608	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	17,9	0,894	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	18,3	1,314	–	17,0	0,01	0,0335	0,740
T	0,0252 *эв*	–	21,6	4,600	–	17,0	0,01	0,0335	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,01	0,05	0,18	0,37	0,32	0,22	0,08	0,03	0,01
2	0,03	0,28	0,31	0,33	0,22	0,09	0,03	0,01	–
3	0,03	0,36	0,31	0,17	0,09	0,03	0,01	–	–
4	0,00	0,13	0,20	0,10	0,05	0,02	–	–	–

i	f_c при σ_0, равной					f_t при σ_0, равной			f_e при σ_e, равной				
	∞	**102**	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**	∞	**10**	**1**	**0**
2	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	0,99	0,98
3	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	0,99	0,96	0,94	1,00	1,00	0,98	0,96
4	1,00	1,00	0,99	0,95	0,94	1,00	0,97	0,90	0,86	1,00	0,99	0,95	0,93
5	1,00	1,00	0,96	0,91	0,88	1,00	0,94	0,78	0,66	1,00	0,98	0,91	0,85
6	1,00	0,99	0,89	0,75	0,67	1,00	0,83	0,64	0,53	1,00	0,90	0,78	0,72
7	1,00	0,99	0,87	0,71	0,66	1,00	0,77	0,55	0,47	1,00	0,88	0,72	0,67
8	1,00	0,98	0,81	0,58	0,53	1,00	0,77	0,49	0,36	1,00	0,90	0,69	0,60
9	1,00	0,98	0,78	0,60	0,59	1,00	0,78	0,62	0,53	1,00	0,87	0,76	0,73
10	1,00	0,93	0,73	0,59	0,57	1,00	0,90	0,84	0,83	1,00	0,94	0,91	0,90
11	1,00	0,84	0,62	0,34	0,32	1,00	0,30	0,15	0,13	1,00	0,57	0,34	0,30
12	1,00	1,00	0,90	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	0,98	0,64	0,55	0,54	1,00	0,89	0,87	0,87	1,00	0,93	0,92	0,92

Медь (Cu)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 Мэв	0,48	3,70	0,040	1,56	2,10	0,84	0,0062	0,066
2	4,0–6,5 Мэв	0,48	3,90	0,014	1,59	2,30	0,73	0,0084	0,065
3	2,5–4,0 Мэв	0,48	3,40	0,005	1,45	1,94	0,52	0,0150	0,071
4	1,4–2,5 Мэв	0,57	3,20	0,006	0,8	2,39	0,29	0,0222	0,093
5	0,8–1,4 Мэв	0,57	3,50	0,010	0,20	3,29	016	0,0262	0,151
6	0,4–0,8 Мэв	0,69	4,20	0,014	–	4,19	0,11	0,0278	0,169
7	0,2–0,4 Мэв	0,69	5,00	0,020	–	4,98	0,17	0,0290	0,209
8	0,1–0,2 Мэв	0,69	5,20	0,028	–	5,17	0,14	0,0300	0,226
9	46,5–100 кэв	0,77	6,00	0,040	–	5,96	0,02	0,0306	0,237
10	21,5–46,5 кэв	0,77	8,00	0,090	–	7,91	0,01	0,0309	0,317
11	10,0–21,5 кэв	0,77	9,50	0,14	–	9,36	0,01	0,0309	0,376
12	4,65–10,0 кэв	0,77	10,0	0,24	–	9,76	0,01	0,0309	0,392
13	2,15–4,65 кэв	0,77	9,90	0,24	–	9,66	0,01	0,0309	0,388
14	1,0–2,15 кэв	0,77	24,9	0,36	–	24,5	0,01	0,0309	0,983
15	465–1000 эв	0,77	11,1	1,70	–	9,40	0,01	0,0309	0,377
16	215–465 эв	0,77	7,08	0,28	–	6,80	0,01	0,0309	0,273
17	100–215 эв	0,77	7,12	0,020	–	7,10	0,01	0,0309	0,285
18	46,5–100 эв	0,77	7,35	0,047	–	7,30	0,01	0,0309	0,293
19	21,5–46,5 эв	0,77	7,48	0,080	–	7,40	0,01	0,0309	0,297
20	10,0–21,5 эв	0,77	7,65	0,15	–	7,50	0,01	0,0309	0,301
21	4,65–10 эв	0,77	7,83	0,23	–	7,60	0,01	0,0309	0,305

22	2,15–4,65 эв	0,77	8,04	0,34	–	7,70	0,01	0,0309	0,309
23	1,0–2,15 эв	0,77	8,30	0,50	–	7,80	0,01	0,0309	0,313
24	0,465–1,0 эв	0,77	8,54	0,74	–	7,80	0,01	0,0309	0,313
25	0,215–0,465эв	0,77	8,88	1,08	–	7,80	0,01	0,0309	0,313
T	0,0252 эв	–	11,65	3,85	–	7,80	0,01	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,01	0,06	0,22	0,46	0,41	0,26	0,10	0,03	0,01
2	0,05	0,21	0,46	0,42	0,30	0,11	0,03	0,01	–
3	0,15	0,45	0,39	0,28	0,13	0,04	0,01	–	–
4	0,15	043	0,20	0,02	–	–	–	–	–
5	0,00	0,09	0,08	0,02	0,01	–	–	–	–

i	f_c при σ_0, равной					f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
	∞	**103**	**102**	**10**	**0**	∞	**102**	**10**	**0**	∞	**102**	**10**	**0**
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	0,93	0,93	1,00	1,00	0,99	0,91	1,00	1,00	1,00	0,96
7	1,00	1,00	1,00	0,84	0,84	1,00	1,00	0,98	0,86	1,00	1,00	0,99	0,92
8	1,00	1,00	0,98	0,72	0,72	1,00	0,97	0,87	0,75	1,00	0,99	0,92	0,83
9	1,00	1,00	0,94	0,50	0,50	1,00	0,90	0,78	0,65	1,00	0,95	0,85	0,75
10	1,00	0,98	0,88	0,41	0,41	1,00	0,85	0,63	0,55	1,00	0,91	0,75	0,60
11	1,00	0,99	0,92	0,33	0,33	1,00	0,70	0,48	0,36	1,00	0,75	0,60	0,45
12	1,00	0,97	0,89	0,43	0,43	1,00	0,73	0,55	0,44	1,00	0,82	0,63	0,51
13	1,00	0,97	0,82	0,50	0,50	1,00	0,77	0,65	0,62	1,00	0,84	0,70	0,66
14	1,00	0,89	0,63	0,44	0,44	1,00	0,44	0,30	0,25	1,00	0,56	0,37	0,28
15	1,00	0,74	0,35	0,09	0,09	1,00	0,72	0,68	0,67	1,00	0,78	0,69	0,69
16	1,00	0,97	0,80	0,30	0,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Цирконий (Zr)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	4,20	0,010	1,75	2,44	0,75	0,0055	0,068
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,90	0,004	1,65	2,25	0,58	0,0092	0,069
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	4,30	0,004	1,35	2,95	0,43	0,0126	0,091
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	5,00	0,005	0,73	4,27	0,37	0,0139	0,104
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,80	0,010	0,20	6,59	0,36	0,0141	0,163
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,50	0,013	0,00	8,49	0,27	0,0161	0,198
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	7,80	0,013	–	7,79	0,14	0,0190	0,214
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	8,80	0,014	–	8,79	0,08	0,0203	0,259
9	46,5–100 *кэв*	0,77	8,20	0,018	–	8,18	0,04	0,0211	0,224
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	9,40	0,022	–	9,38	0,02	0,0216	0,263
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	7,80	0,027	–	7,77	0,01	0,0218	0,220
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	9,00	0,030	–	8,97	0,01	0,0218	0,254
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	8,00	0,035	–	7,96	0,01	0,0218	0,225
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	7,18	0,047	–	7,13	0,01	0,0218	0,202
15	465–1000 *эв*	0,77	6,52	0,163	–	6,36	0,01	0,0218	0,180

16	215–465 *эв*	0,77	8,88	0,980	–	7,90	0,01	0,0218	0,224
17	100–215 *эв*	0,77	6,29	0,093	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
18	46,5–100 *эв*	0,77	6,20	0,004	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	6,20	0,005	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	6,21	0,008	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
21	4,65–10 *эв*	0,77	6,21	0,011	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	6,22	0,016	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	6,22	0,024	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	6,24	0,036	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	6,25	0,052	–	6,20	0,01	0,0218	0,176
T	0,0252 *эв*	–	6,38	0,185	–	6,20	0,01	0,0218	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,02	0,10	0,42	0,51	0,44	0,019	0,05	0,02
2	0,01	0,06	0,33	0,46	0,46	0,21	0,08	0,03	0,01
3	0,10	0,40	0,31	0,30	0,16	0,03	0,02	–	–
4	0,07	0,25	0,29	0,08	0,03	0,01	–	–	–
5	0,00	0,05	0,10	0,04	0,01	–	–	–	–

i	***T*, °K**	f_c **при** σ_0**, равной**					f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_e**, равной**			
		∞	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**
	300	1,00	1,00	1,00	0,96	0,87	1,00	0,98	0,93	0,85	1,00	0,98	0,95	0,93
10	900	1,00	1,00	1,00	0,97	0,90	1,00	0,98	0,93	0,85	1,00	0,98	0,95	0,93
	2100	1,00	1,00	1,00	0,97	0,93	1,00	0,98	0,93	0,85	1,00	0,98	0,95	0,93
	300	1,00	1,00	0,99	0,89	0,78	1,00	0,97	0,92	0,85	1,00	0,98	0,94	0,92
11	900	1,00	1,00	0,99	0,91	0,82	1,00	0,97	0,92	0,85	1,00	0,98	0,94	0,92
	2100	1,00	1,00	1,00	0,94	0,86	1,00	0,97	0,92	0,85	1,00	0,98	0,94	0,92
	300	1,00	1,00	0,96	0,81	0,68	1,00	0,96	0,91	0,85	1,00	0,97	0,93	0,91
12	900	1,00	1,00	0,98	0,85	0,73	1,00	0,96	0,91	0,85	1,00	0,97	0,93	0,91
	2100	1,00	1,00	0,99	0,89	0,78	1,00	0,96	0,91	0,85	1,00	0,97	0,93	0,91
	300	1,00	0,97	0,82	0,53	0,40	1,00	0,95	1,00	0,86	1,00	0,96	0,92	0,90
13	900	1,00	0,98	0,83	0,55	0,42	1,00	0,95	1,00	0,86	1,00	0,96	0,92	0,90
	2100	1,00	0,98	0,87	0,57	0,45	1,00	0,95	1,00	0,86	1,00	0,96	0,92	0,90
	300	1,00	0,96	0,75	0,39	0,25	0,99	0,93	0,99	0,86	0,99	0,96	0,90	0,88
14	900	1,00	0,96	0,75	0,39	0,25	0,99	0,93	0,99	0,86	0,99	0,96	0,90	0,88
	2100	1,00	0,96	0,75	0,39	0,25	0,99	0,93	0,99	0,86	0,99	0,96	0,90	0,88
	300	1,00	0,95	0,69	0,32	0,19	0,99	0,96	1,00	0,93	1,00	0,98	0,96	0,95
15	900	1,00	0,97	0,75	0,36	0,21	0,99	0,97	1,00	0,93	1,00	0,99	0,97	0,96
	2100	1,00	0,98	0,75	0,40	0,23	0,99	0,97	1,00	0,93	1,00	0,99	0,97	0,96
	300	1,00	0,89	0,55	0,25	0,16	0,93	0,79	0,97	0,71	0,97	0,89	0,82	0,80

16	900	1,00	0,90	0,58	0,27	0,17	0,94	0,80	0,98	0,71	0,98	0,90	0,82	0,80
	2100	1,00	0,92	0,63	0,29	0,18	0,95	0,81	0,98	0,71	0,98	0,91	0,83	0,81
	300	1,00	1,00	0,83	0,73	0,54	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
17	900	1,00	1,00	0,85	0,79	0,60	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	0,97	0,84	0,66	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00

Ниобий (Nb)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	4,00	0,005	1,80	2,19	0,75	0,054	0,0600
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,90	0,005	1,90	2,00	0,67	0,0071	0,0476
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	4,50	0,008	1,95	2,54	0,60	0,0086	0,0537
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	5,60	0,010	1,80	3,79	0,50	0,0108	0,0718
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,00	0,030	0,95	6,02	0,39	0,0132	0,139
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,50	0,055	0,05	8,40	0,28	0,0156	0,190
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,00	0,070	0,03	8,90	0,17	0,0179	0,231
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	9,00	0,110	–	8,89	0,09	0,0197	0,254
9	46,5–100 *кэв*	0,77	8,40	0,16	–	8,24	0,05	0,0205	0,219
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	7,70	0,30	–	7,40	0,03	0,0210	0,202
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	7,40	0,55	–	6,85	0,02	0,0212	0,189
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	8,50	1,10	–	7,40	0,01	0,0214	0,206
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	9,80	2,00	–	7,80	0,01	0,0214	0,217
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	12,3	3,40	–	8,90	0,01	0,0214	0,247
15	465–1000 *эв*	0,77	9,322	1,87	–	7,45	0,01	0,0214	0,207
16	215–465 *эв*	0,77	8,98	2,38	–	6,60	0,01	0,0214	0,183
17	100–215 *эв*	0,77	9,62	3,32	–	6,30	0,01	0,0214	0,175
18	46,5–100 *эв*	0,77	6,32	0,12	–	6,20	0,01	0,0214	0,172
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	7,03	0,53	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	6,55	0,05	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
21	4,65–10 *эв*	0,77	6,57	0,07	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	6,60	0,10	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	6,65	0,15	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	6,72	0,22	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	6,82	0,32	–	6,50	0,01	0,0214	0,181
T	0,0252 *эв*	–	7,66	1,16	–	6,50	0,01	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,02	0,11	0,43	0,52	0,45	0,20	0,05	0,02
2	0,02	0,08	0,40	0,50	0,55	0,24	0,09	0,02	–
3	0,15	0,45	0,50	0,40	0,31	0,11	0,03	–	–
4	0,25	0,44	0,48	0,40	0,18	0,05	–	–	–
5	0,14	0,15	0,39	0,17	0,08	0,02	–	–	–
6	0,04	0,01	–	–	–	–	–	–	–
7	0,02	0,01	–	–	–	–	–	–	–

`i	T, °K	f_c при σ_0, равной					f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
		∞	10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0
10	300	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	900	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	300	1,00	1,00	0,99	0,90	0,80	1,00	0,98	0,96	0,90	1,00	1,00	0,98	0,97
	900	1,00	1,00	0,99	0,97	0,90	1,00	0,99	0,98	0,95	1,00	1,00	0,99	0,98
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99
12	300	1,00	1,00	0,95	0,76	0,62	1,00	0,96	0,88	0,80	1,00	0,99	0,96	0,93
	900	1,00	1,00	0,97	0,87	0,75	1,00	0,97	0,94	0,86	1,00	0,99	0,98	0,96
	2100	1,00	1,00	0,98	0,98	0,84	1,00	0,99	0,97	0,89	1,00	1,00	0,99	0,97
13	300	1,00	0,97	0,89	0,60	0,40	1,00	0,94	0,76	0,70	1,00	0,98	0,93	0,89
	900	1,00	0,99	0,94	0,70	0,53	1,00	0,96	0,81	0,72	1,00	0,99	0,95	0,91
	2100	1,00	1,00	0,97	0,80	0,64	1,00	0,98	0,89	0,77	1,00	0,99	0,96	0,94
14	300	1,00	0,92	0,71	0,43	0,28	0,95	0,84	0,73	0,68	0,98	0,93	0,88	0,86
	900	1,00	0,96	0,77	0,51	0,36	0,97	0,83	0,76	0,70	0,99	0,94	0,90	0,87
	2100	1,00	0,98	0,81	0,58	0,43	0,98	0,89	0,80	0,73	0,99	0,95	0,90	0,89
15	300	1,00	0,88	0,55	0,30	0,21	0,89	0,75	0,70	0,67	0,96	0,88	0,84	0,83
	900	1,00	0,92	0,62	0,35	0,24	0,93	0,77	0,71	0,68	0,97	0,90	0,84	0,83
	2100	1,00	0,94	0,66	0,39	0,27	0,95	0,80	0,72	0,69	0,98	0,91	0,85	0,83
16	300	1,00	0,86	0,52	0,20	0,11	0,89	0,77	0,71	0,69	0,98	0,95	0,93	0,92
	900	1,00	0,91	0,57	0,28	0,18	0,92	0,79	0,72	0,69	0,98	0,95	0,93	0,92
	2100	1,00	0,92	0,60	0,33	0,124	0,94	0,81	0,75	0,70	0,99	0,96	0,93	0,92
17	300	1,00	0,87	0,52	0,19	0,10	0,89	0,74	0,67	0,65	0,98	0,97	0,96	0,96
	900	1,00	0,90	0,58	0,27	0,17	0,92	0,77	0,67	0,65	0,99	0,97	0,96	0,96
	2100	1,00	0,92	0,59	0,35	0,20	0,94	0,80	0,68	0,66	0,99	0,98	0,97	0,96
18	300	1,00	1,00	0,84	0,76	0,56	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	900	1,00	1,00	0,88	0,81	0,65	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	0,90	0,86	0,70	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
19	300	1,00	1,00	0,91	0,74	0,56	1,00	0,99	0,97	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00
	900	1,00	1,00	0,93	0,80	0,64	1,00	0,99	0,97	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	0,96	0,84	0,70	1,00	0,99	0,98	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00

Молибден (Mo)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	4,10	0,020	1,85	2,23	0,75	0,0052	0,059
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	3,90	0,007	1,92	1,97	0,65	0,0073	0,048
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	4,10	0,015	1,97	2,12	0,55	0,0094	0,049
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	5,40	0,020	1,65	3,73	0,46	0,0113	0,074
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,50	0,028	0,75	5,72	0,42	0,0121	0,121
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,00	0,042	0,15	7,81	0,31	0,0144	0,163
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	8,90	0,052	0,04	8,81	0,20	0,0167	0,213
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	9,00	0,070	0,00	8,93	0,11	0,0186	0,241
9	46,5–100 *кэв*	0,77	8,20	0,100	–	8,10	0,07	0,0194	0,204
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	7,60	0,150	–	7,45	0,04	0,0200	0,194
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	7,20	0,26	–	6,94	0,02	0,0205	0,185
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	7,50	0,45	–	7,05	0,01	0,0207	0,190
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	8,50	0,55	–	7,95	0,01	0,0207	0,214
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	10,0	0,70	–	9,30	0,01	0,0207	0,250
15	465–1000 *эв*	0,77	11,2	1,70	–	9,50	0,01	0,0207	0,255
16	215–465 *эв*	0,77	10,2	1,50	–	8,70	0,01	0,0207	0,234
17	100–215 *эв*	0,77	11,2	3,30	–	7,90	0,01	0,0207	0,212
18	46,5–100 *эв*	0,77	25,0	11,0	–	14,0	0,01	0,0207	0,376
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	24,0	10,0	–	14,0	0,01	0,0207	0,376
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	6,14	0,64	–	5,50	0,01	0,0207	0,148
21	4,65–10 *эв*	0,77	5,66	0,16	–	5,50	0,01	0,0207	0,148
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	5,74	0,24	–	5,50	0,01	0,0207	0,148
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	5,85	0,35	–	5,50	0,01	0,0207	0,148
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	6,02	0,52	–	5,50	0,01	0,0207	0,148
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	6,26	0,76	–	5,50	0,01	0,0207	0,148
T	0,0252 *эв*	–	8,20	2,70	–	5,50	0,01	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,02	0,11	0,43	0,56	0,46	0,20	0,05	0,02
2	0,00	0,06	0,35	0,55	0,55	0,27	0,10	0,03	0,01
3	0,10	0,40	0,42	0,54	0,33	0,14	0,03	0,01	–
4	0,16	0,40	0,50	0,30	0,20	0,07	0,02	–	–
5	0,07	0,27	0,24	0,11	0,06	–	–	–	–
6	0,05	0,08	0,02	–	–	–	–	–	–
7	0,00	0,03	0,01	–	–	–	–	–	–

i	$T,^oK$	f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
		10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0
12	300	1,00	0,98	0,94	0,90	1,00	0,96	0,91	0,84	1,00	0,98	0,93	0,89
	900	1,00	0,99	0,95	0,91	1,00	0,98	0,93	0,86	1,00	0,99	0,95	0,92
	2100	1,00	0,99	0,97	0,93	1,00	0,99	0,96	0,89	1,00	0,99	0,96	0,93

	300	1,00	0,94	0,83	0,77	1,00	0,92	0,80	0,77	1,00	0,95	0,88	0,84
13	900	1,00	0,96	0,86	0,79	1,00	0,83	0,83	0,78	1,00	0,98	0,90	0,85
	2100	1,00	0,98	0,88	0,82	1,00	0,86	0,86	0,79	1,00	0,99	0,92	0,86
	300	0,98	0,88	0,69	0,62	0,98	0,84	0,70	0,67	0,98	0,94	0,84	0,79
14	900	0,98	0,90	0,72	0,63	0,98	0,86	0,70	0,67	0,99	0,96	0,86	0,80
	2100	0,99	0,93	0,75	0,65	0,99	0,87	0,70	0,67	0,99	0,97	0,88	0,81
	300	0,93	0,66	0,41	0,33	0,92	0,72	0,60	0,55	0,97	0,83	0,78	0,75
15	900	0,95	0,72	0,43	0,34	0,93	0,72	0,60	0,56	0,98	0,85	0,79	0,75
	2100	0,97	0,77	0,47	0,38	0,93	0,73	0,61	0,56	0,99	0,89	0,80	0,76
	300	0,88	0,59	0,36	0,28	0,96	0,88	0,85	0,84	0,99	0,97	0,96	0,95
16	900	0,90	0,63	0,38	0,29	0,96	0,90	0,86	0,84	0,99	0,98	0,96	0,95
	2100	0,91	0,65	0,41	0,31	0,97	0,90	0,86	0,84	0,99	0,98	0,96	0,96
	300	0,80	0,40	0,18	0,11	0,83	0,61	0,54	0,52	0,94	0,81	0,74	0,73
17	900	0,87	0,44	0,19	0,12	0,86	0,62	0,54	0,52	0,96	0,82	0,75	0,73
	2100	0,88	0,49	0,23	0,13	0,87	0,63	0,55	0,52	0,96	0,84	0,76	0,74
	300	0,64	0,28	0,13	0,08	0,62	0,41	0,36	0,35	0,83	0,66	0,60	0,59
18	900	0,68	0,30	0,14	0,09	0,64	0,42	0,36	0,35	0,85	0,67	0,60	0,59
	2100	0,70	0,32	0,17	0,10	0,69	0,42	0,37	0,35	0,86	0,68	0,62	0,60
	300	0,61	0,24	0,11	0,06	0,49	0,24	0,18	0,16	0,70	0,45	0,33	0,30
19	900	0,65	0,26	0,11	0,08	0,52	0,24	0,18	0,17	0,74	0,44	0,33	0,31
	2100	0,68	0,27	0,14	0,09	0,58	0,24	0,19	0,17	0,76	0,45	0,35	0,32

Тантал (Ta)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	5,0	0,01	2,50	2,49	0,83	0,00187	0,024
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	5,7	0,03	2,70	2,97	0,78	0,00242	0,024
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	6,8	0,04	2,80	3,96	0,70	0,00330	0,033
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,4	0,10	2,80	4,50	0,60	0,00440	0,035
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,5	0,14	2,25	5,11	0,45	0,00605	0,054
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,8	0,20	1,35	6,25	0,32	0,00748	0,068
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	8,0	0,27	0,60	7,13	0,19	0,00891	0,092
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	8,4	0,32	0,24	7,84	0,11	0,00979	0,111
9	46,5–100 *кэв*	0,77	9,0	0,45	0,07	8,48	0,05	0,0104	0,115
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	10,0	0,8	0,03	9,2	0,02	0,01078	0,129
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	12,0	1,5	–	10,5	0,01	0,01089	0,148
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	15,0	2,9	–	12,1	0,00	0,0110	0,173
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	19,0	5,3	–	13,7	0,00	0,0110	0,196

14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	25,0	9,6	–	15,4	0,00	0,0110	0,220
15	465–1000 *эв*	0,77	340	16,7	–	17,3	0,00	0,0110	0,247
16	215–465 *эв*	0,77	47,0	28	–	19	0,00	0,0110	0,272
17	100–215 *эв*	0,77	64,0	32	–	32	0,00	0,0110	0,457
18	46,5–100 *эв*	0,77	64,0	32	–	32	0,00	0,0110	0,457
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	157	104	–	53	0,00	0,0110	0,757
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	123	111	–	12,4	0,00	0,0110	0,177
21	4,65–10 *эв*	0,77	23	16	–	7,0	0,00	0,0110	0,100
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	520	483	–	37,0	0,00	0,0110	0,529
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	10,2	4,2	–	6,0	0,00	0,0110	0,086
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	10,9	4,9	–	6,0	0,00	0,0110	0,086
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	12,4	6,4	–	6,0	0,00	0,0110	0,086
T	0,0252 *эв*	–	27,0	21	–	6,0	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,02	0,16	0,59	0,73	0,62	0,26	0,09	0,03
2	0,01	0,08	0,48	0,78	0,80	0,37	0,13	0,04	0,01
3	0,03	0,30	0,73	0,95	0,52	0,19	0,07	0,01	–
4	0,14	0,56	1,04	0,67	0,28	0,08	0,03	–	–
5	1,00	0,69	0,30	0,14	0,09	0,03	–	–	–
6	0,85	0,40	0,08	0,02	–	–	–	–	–
7	0,35	0,17	0,08	–	–	–	–	–	–
8	0,17	0,04	0,02	0,01	–	–	–	–	–
9	0,06	0,01	–	–	–	–	–	–	–
10	0,02	0,01	–	–	–	–	–	–	–

i	***T*,°K**	f_c **при** σ_0**, равной**						f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_e**, равной**			
		10^5	10^4	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**
	300	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,91	1,00	1,00	0,99	0,95	1,00	1,00	1,00	0,99
10	900	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,98	0,91	0,83	0,75	1,00	0,96	0,90	0,89	1,00	0,97	0,95	0,92
11	900	1,00	1,00	0,99	0,93	0,86	0,79	1,00	0,97	0,91	0,90	1,00	0,99	0,96	0,93
	2100	1,00	1,00	1,00	0,94	0,88	0,83	1,00	0,98	0,92	0,90	1,00	1,00	0,98	0,94
	300	1,00	1,00	0,95	0,78	0,62	0,51	0,94	0,82	0,75	0,72	0,99	0,90	0,84	0,79
12	900	1,00	1,00	0,97	0,80	0,66	0,55	0,95	0,83	0,76	0,73	1,00	0,92	0,85	0,81
	2100	1,00	1,00	0,98	0,82	0,67	0,57	0,96	0,85	0,77	0,74	1,00	0,93	0,86	0,83
	300	1,00	1,00	0,91	0,65	0,40	0,35	0,88	0,64	0,55	0,52	0,96	0,81	0,66	0,60
13	900	1,00	1,00	0,94	0,67	0,43	0,37	0,90	0,66	0,57	0,53	0,97	0,82	0,67	0,62
	2100	1,00	1,00	0,96	0,68	0,45	0,40	0,92	0,70	0,60	0,55	0,98	0,83	0,69	0,64
	300	1,00	1,00	0,88	0,54	0,26	0,18	0,83	0,50	0,36	0,34	0,93	0,72	0,55	0,50

14	900	1,00	1,00	0,91	0,60	0,30	0,21	0,85	0,55	0,37	0,35	0,95	0,76	0,57	0,51
	2100	1,00	1,00	0,95	0,67	0,35	0,31	0,88	0,62	0,38	0,37	0,97	0,80	0,60	0,57
	300	1,00	1,00	0,86	0,50	0,22	0,15	0,80	0,43	0,30	0,28	0,89	0,66	0,50	0,46
15	900	1,00	1,00	0,90	0,58	0,28	0,19	0,85	0,50	0,32	0,29	0,92	0,71	0,53	0,47
	2100	1,00	1,00	0,94	0,67	0,35	0,27	0,88	0,57	0,34	0,30	0,95	0,76	0,56	0,52
	300	1,00	1,00	0,84	0,45	0,18	0,12	0,76	0,36	0,24	0,21	0,85	0,59	0,44	0,41
16	900	1,00	1,00	0,89	0,56	0,26	0,17	0,84	0,44	0,26	0,22	0,89	0,65	0,48	0,43
	2100	1,00	1,00	0,93	0,66	0,34	0,23	0,87	0,51	0,30	0,23	0,92	0,70	0,51	0,46
	300	1,00	1,00	0,67	0,32	0,13	0,08	0,63	0,22	0,15	0,13	0,70	0,40	0,27	0,24
17	900	1,00	1,00	0,78	0,41	0,18	0,11	0,74	0,27	0,17	0,14	0,80	0,47	0,30	0,28
	2100	1,00	1,00	0,85	0,50	0,24	0,17	0,82	0,33	0,19	0,16	0,86	0,54	0,33	0,31
	300	1,00	0,99	0,69	0,32	0,13	0,08	0,48	0,22	0,15	0,12	0,55	0,31	0,24	0,23
18	900	1,00	1,00	0,74	0,39	0,18	012	0,55	0,25	0,16	0,13	0,59	0,33	0,25	0,24
	2100	1,00	1,00	0,80	0,48	0,25	0,17	0,61	0,29	0,18	0,15	0,65	0,35	0,27	0,25
	300	1,00	0,90	0,41	0,15	0,07	0,06	0,22	0,11	0,09	0,06	0,46	0,23	0,17	0,15
19	900	1,00	0,92	0,48	0,17	0,08	0,06	0,30	0,12	0,09	0,06	0,50	0,24	0,17	0,15
	2100	1,00	0,98	0,55	0,20	0,09	0,07	0,36	0,13	0,09	0,06	0,55	0,25	0,18	0,15
	300	1,00	0,87	0,46	0,19	0,09	0,06	0,37	0,15	0,08	0,06	0,74	0,58	0,53	0,52
20	900	1,00	0,87	0,56	0,21	0,09	0,06	0,42	0,16	0,08	0,06	0,77	0,59	0,53	0,52
	2100	1,00	0,97	0,71	0,25	0,10	0,06	0,51	0,18	0,08	0,07	0,80	0,61	0,53	0,52
	300	1,00	1,00	0,97	0,83	0,59	0,48	0,83	0,78	0,57	0,49	0,87	0,84	0,62	0,52
21	900	1,00	1,00	0,97	0,83	0,59	0,48	0,83	0,78	0,57	0,49	0,87	0,84	0,62	0,52
	2100	1,00	1,00	0,97	0,83	0,59	0,48	0,83	0,78	0,57	0,49	0,87	0,84	0,62	0,52
	300	0,87	0,65	0,24	0,07	0,03	0,02	0,10	0,04	0,02	0,02	0,39	0,23	0,19	0,18
22	900	0,87	0,68	0,27	0,08	0,03	0,02	0,11	0,04	0,02	0,02	0,42	0,23	0,19	0,18
	2100	0,88	0,74	0,30	0,08	0,03	0,02	0,12	0,04	0,02	0,02	0,45	0,23	0,19	0,18

Вольфрам (W)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	4,90	0,015	0,015	2,55	0,83	0,0018	0,021
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	5,80	0,02	0,02	2,60	0,78	0,0024	0,026
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	6,80	0,04	0,04	2,65	0,70	0,0032	0,032
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,00	0,06	0,06	2,60	0,60	0,0043	0,049
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,00	0,09	0,09	2,25	0,44	0,0060	0,065
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,10	0,09	0,09	1,35	0,27	0,0079	0,098

7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	8,00	0,11	0,11	0,45	0,16	0,0091	0,118
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	8,40	0,15	0,15	0,05	0,08	0,0099	0,119
9	46,5–100 *кэв*	0,77	9,00	0,22	0,22	–	0,04	0,0104	0,130
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	9,80	0,33	0,33	–	0,02	0,0106	0,160
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	12,0	0,50	0,50	–	0,01	0,0107	0,227
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	17,0	0,80	0,80	–	0,00	0,0108	0,317
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	24,0	1,4	1,4	–	0,00	0,0108	0,455
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	35,0	2,6	2,6	–	0,00	0,0108	0,617
15	465–1000 *эв*	0,77	49,0	5,0	5,0	–	0,00	0,0108	4,01
16	215–465 *эв*	0,77	295	9,0	9,0	–	0,00	0,0108	1,28
17	100–215 *эв*	0,77	114	23	23	–	0,00	0,0108	0,196
18	46,5–100 *эв*	0,77	23,0	9,0	9,0	–	0,00	0,0108	0,884
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	148	85	85	–	0,00	0,0108	13,9
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	1190	200	200	–	0,00	0,0108	0,149
21	4,65–10 *эв*	0,77	33,6	23	23	–	0,00	0,0108	0,123
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	132	123	123	–	0,00	0,0108	0,070
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	8,20	3,2	3,2	–	0,00	0,0108	0,070
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	9,00	4,0	4,0	–	0,00	0,0108	0,070
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	10,6	5,6	5,6	–	0,00	0,0108	0,070
T	0,0252 *эв*	–	24,2	19,2	19,2	–	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,02	0,10	0,51	0,74	0,32	0,10	0,03	0,01
2	0,01	0,09	0,54	0,72	0,75	0,11	0,03	0,01	–
3	0,09	0,16	0,65	0,88	0,55	0,08	0,03	0,01	–
4	0,58	0,84	0,55	0,42	0,16	0,01	–	–	–
5	1,15	0,75	0,20	0,11	0,04	–	–	–	–
6	0,88	0,44	0,02	0,01	–	–	–	–	–
7	0,15	0,27	0,03	–	–	–	–	–	–
8	0,00	0,03	0,02	–	–	–	–	–	–

i	***T*,°K**	f_c **при** σ_0**, равной**						f_t **при** σ_0**, равной**				f_e **при** σ_e**, равной**			
		∞	10^4	10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0
	300	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,99	0,98
12	900	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00	0,98
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99
	300	1,00	1,00	0,97	0,91	0,88	0,85	0,99	0,97	0,91	0,87	1,00	0,98	0,95	0,94
13	900	1,00	1,00	0,99	0,94	0,90	0,87	1,00	0,98	0,93	0,89	1,00	0,99	0,96	0,95
	2100	1,00	1,00	1,00	0,97	0,93	0,90	1,00	0,98	0,94	0,91	1,00	0,99	0,97	0,96
	300	1,00	0,98	0,89	0,75	0,68	0,60	0,97	0,87	0,75	0,69	0,98	0,92	0,85	0,81
14	900	1,00	0,99	0,92	0,81	0,73	0,63	0,98	0,89	0,78	0,72	0,98	0,95	0,87	0,83
	2100	1,00	1,00	0,94	0,88	0,78	0,67	0,98	0,90	0,81	0,75	1,00	0,98	0,90	0,85

	300	1,00	0,95	0,76	0,52	0,40	0,32	0,88	0,68	0,50	0,40	0,95	0,81	0,68	0,58
15	900	1,00	0,97	0,82	0,63	0,45	0,35	0,91	0,74	0,58	0,45	0,97	0,85	0,70	0,62
	2100	1,00	1,00	0,87	0,74	0,51	0,38	0,92	0,80	0,65	0,50	0,98	0,88	0,72	0,65
	300	1,00	0,93	0,65	0,35	0,24	0,17	0,60	0,30	0,20	0,15	0,70	0,37	0,26	0,20
16	900	1,00	0,95	0,72	0,45	0,28	0,19	0,70	0,37	0,23	0,17	0,76	0,48	0,29	0,21
	2100	1,00	0,98	0,80	0,56	0,31	0,20	0,80	0,45	0,27	0,19	0,83	0,58	0,33	0,22
	300	1,00	0,90	0,56	0,25	0,15	0,10	0,37	0,17	0,11	0,1	0,55	0,26	0,18	0,14
17	900	1,00	0,90	0,58	0,26	0,16	0,11	0,38	0,18	0,11	0,1	0,56	0,27	0,18	0,14
	2100	1,00	0,91	0,59	0,28	0,17	0,11	0,39	0,19	0,12	0,1	0,57	0,28	0,18	0,14
	300	1,00	0,98	0,80	0,36	0,17	0,14	0,71	0,47	0,20	0,18	0,86	0,65	0,55	0,53
18	900	1,00	0,99	0,84	0,38	0,18	0,15	0,76	0,48	0,20	0,19	0,88	0,67	0,56	0,54
	2100	1,00	1,00	0,88	0,43	0,20	0,17	0,81	0,49	0,21	0,19	0,90	0,68	0,57	0,55
	300	1,00	0,98	0,71	0,32	0,19	0,17	0,52	0,22	0,13	0,10	0,73	0,37	0,25	0,23
19	900	1,00	0,98	0,75	0,35	0,20	0,18	0,58	0,24	0,14	0,11	0,77	0,39	0,26	0,23
	2100	1,00	0,99	0,83	0,38	0,22	0,19	0,65	0,26	0,15	0,12	0,84	0,42	0,27	0,24
	300	1,00	0,73	0,31	0,096	0,042	0,039	0,14	0,033	0,018	0,016	0,29	0,092	0,044	0,035
20	900	1,00	0,74	0,32	0,098	0,043	0,039	0,15	0,036	0,022	0,016	0,30	0,093	0,044	0,035
	2100	1,00	0,74	0,34	0,102	0,044	0,039	0,17	0,041	0,029	0,016	0,31	0,097	0,045	0,035
	300	1,00	0,97	0,84	0,41	0,19	0,15	0,81	0,49	0,39	0,38	1,00	1,00	1,00	1,0
21	900	1,00	0,98	0,89	0,46	0,21	0,15	0,86	0,55	0,40	0,38	1,00	1,00	1,00	1,0
	2100	1,00	0,99	0,93	0,53	0,23	0,16	0,92	0,58	0,42	0,39	1,00	1,00	1,00	1,0
	300	1,00	0,98	0,65	0,21	0,085	0,060	0,42	0,13	0,10	0,08	0,87	0,70	0,65	0,64
22	900	1,00	0,98	0,75	0,22	0,087	0,062	0,51	0,13	0,10	0,08	0,91	0,71	0,65	0,64
	2100	1,00	0,99	0,83	0,25	0,090	0,063	0,59	0,13	0,10	0,08	0,94	0,72	0,65	0,64

Рений (Re)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	5,00	0,007	2,55	2,44	0,83	0,0018	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	6,00	0,010	2,60	3,39	0,78	0,0024	0,027
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	6,50	0,015	2,65	3,84	0,70	0,0032	0,030
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,00	0,030	2,60	4,37	0,60	0,0043	0,033
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,00	0,050	2,25	4,70	0,44	0,0060	0,049
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,50	0,090	1,35	6,06	0,27	0,0078	0,068
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	8,00	0,180	0,45	7,37	0,16	0,0090	0,096
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	9,00	0,35	0,05	8,60	0,08	0,0098	0,122
9	46,5–100 *кэв*	0,77	10,0	0,70	–	9,30	0,04	0,0103	0,124
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	12,0	1,40	–	10,6	0,02	0,0105	0,144

11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	15,0	2,50	–	12,5	0,01	0,0106	0,172
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	25,0	4,00	–	21,0	0,00	0,0107	0,292
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	40,0	7,00	–	33,0	0,00	0,0107	0,459
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	50,0	12,0	–	38,0	0,00	0,0107	0,528
15	465–1000 *эв*	0,77	60,0	22,0	–	38,0	0,00	0,0107	0,528
16	215–465 *эв*	0,77	90,0	50,0	–	40,0	0,00	0,0107	0,556
17	100–215 *эв*	0,77	100	55,0	–	45,0	0,00	0,0107	0,625
18	46,5–100 *эв*	0,77	85,0	47,0	–	38,0	0,00	0,0107	0,528
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	71,0	50,0	–	21,0	0,00	0,0107	0,292
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	74,0	58,0	–	16,0	0,00	0,0107	0,222
21	4,65–10 *эв*	0,77	95,0	79,0	–	16,0	0,00	0,0107	0,222
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	680	600	–	80,0	0,00	0,0107	1,11
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	785	700	–	85,0	0,00	0,0107	1,18
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	40,0	25,0	–	15,0	0,00	0,0107	0,208
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	43,0	28,0	–	15,0	0,00	0,0107	0,208
T	0,0252 *эв*	–	100	86,0	–	14,0	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,02	0,10	0,51	0,74	0,72	0,33	0,10	0,03
2	0,01	0,09	0,54	0,72	0,75	0,34	0,11	0,04	–
3	0,07	0,20	0,62	0,90	0,55	0,22	0,07	0,02	–
4	0,30	0,38	0,84	0,67	0,29	0,09	0,03	–	–
5	0,70	1,10	0,34	0,08	0,03	–	–	–	–
6	0,63	0,57	0,12	0,03	–	–	–	–	–
7	0,12	0,25	0,08	–	–	–	–	–	–
8	0,00	0,02	0,03	–	–	–	–	–	–

i	$T,^oK$	f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
		∞	10^4	10^3	10^2	∞	10^4	10^3	10^2	∞	10^4	10^3	10^2
	300	1,00	1,00	0,98	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	900	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,96	0,80	1,00	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99	0,98
13	900	1,00	1,00	0,98	0,90	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99
	2100	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99
	300	1,00	1,00	0,88	0,65	1,00	0,99	0,97	0,87	1,00	1,00	0,98	0,92
14	900	1,00	1,00	0,90	0,67	1,00	1,00	0,98	0,89	1,00	1,00	0,99	0,99
	2100	1,00	1,00	0,92	0,70	1,00	1,00	0,98	0,90	1,00	1,00	1,00	0,99
	300	1,00	1,00	0,80	0,50	1,00	0,96	0,89	0,68	1,00	1,00	0,95	0,81
15	900	1,00	1,00	0,85	0,60	1,00	0,98	0,91	0,74	1,00	1,00	0,97	0,85
	2100	1,00	1,00	0,90	0,67	1,00	1,00	0,92	0,80	1,00	1,00	0,98	0,88

	300	1,00	1,00	0,75	0,40	1,00	0,95	0,77	0,66	1,00	1,00	0,85	0,75
16	900	1,00	1,00	0,80	0,50	1,00	0,97	0,83	0,70	1,00	1,00	0,87	0,79
	2100	1,00	1,00	0,87	0,60	1,00	0,99	0,88	0,75	1,00	1,00	0,90	0,83
	300	1,00	0,98	0,67	0,32	1,00	0,92	0,65	0,50	1,00	0,98	0,75	0,65
17	900	1,00	1,00	0,78	0,41	1,00	0,95	0,72	0,60	1,00	1,00	0,81	0,70
	2100	1,00	1,00	0,85	0,50	1,00	0,98	0,79	0,70	1,00	1,00	0,86	0,75
	300	1,00	0,95	0,63	0,32	1,00	0,89	0,56	0,32	1,00	0,96	0,73	0,55
18	900	1,00	0,97	0,69	0,39	1,00	0,92	0,66	0,35	1,00	0,97	0,78	0,59
	2100	1,00	0,98	0,75	0,48	1,00	0,94	0,72	0,40	1,00	0,97	0,81	0,63
	300	1,00	0,93	0,55	0,27	1,00	0,86	0,49	0,32	1,00	0,97	0,84	0,74
19	900	1,00	0,95	0,62	0,31	1,00	0,89	0,59	0,34	1,00	0,98	0,87	0,76
	2100	1,00	0,97	0,67	0,36	1,00	0,91	0,66	0,36	1,00	0,99	0,89	0,77
	300	1,00	0,97	0,69	0,42	1,00	0,94	0,63	0,39	1,00	0,99	0,95	0,90
20	900	1,00	0,98	0,75	0,49	1,00	0,95	0,74	0,45	1,00	1,00	0,96	0,91
	2100	1,00	0,99	0,79	0,59	1,00	0,96	0,80	0,54	1,00	1,00	0,96	0,93
	300	1,00	0,92	0,56	0,27	1,00	0,86	0,48	0,29	1,00	0,99	0,93	0,89
21	900	1,00	0,95	0,62	0,31	1,00	0,90	0,55	0,30	1,00	0,99	0,94	0,90
	2100	1,00	0,97	0,68	0,36	1,00	0,91	0,65	0,32	1,00	0,99	0,95	0,90
	300	1,00	0,65	0,25	0,18	1,00	0,46	0,16	0,06	1,00	0,68	0,34	0,28
22	900	1,00	0,66	0,26	0,19	1,00	0,47	0,17	0,06	1,00	0,69	0,35	0,28
	2100	1,00	0,73	0,29	0,20	1,00	0,55	0,18	0,06	1,00	0,75	0,37	0,29
	300	1,00	0,62	0,21	0,12	1,00	0,43	0,13	0,05	1,00	0,68	0,33	0,25
23	900	1,00	0,63	0,22	0,12	1,00	0,43	0,13	0,05	1,00	0,69	0,33	0,26
	2100	1,00	0,70	0,24	0,12	1,00	0,51	0,13	0,05	1,00	0,74	0,36	0,26

Свинец (Pb)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з€}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	5,50	0,000	2,50	3,00	0,84	0,0015	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,20	0,000	2,10	5,10	0,76	0,0023	0,040
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,50	0,001	1,23	6,27	0,52	0,0046	0,071
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	5,90	0,001	0,55	5,35	0,31	0,0066	0,062
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	5,70	0,003	0,29	5,41	0,20	0,0077	0,073
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	5,70	0,004	0,01	5,69	0,13	0,0084	0,069
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	7,40	0,006	–	7,39	0,14	0,0083	0,089
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	9,80	0,005	–	9,79	0,10	0,0086	0,122
9	46,5–100 *кэв*	0,77	10,7	0,004	–	10,7	0,05	0,0091	0,126

10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	10,2	0,002	–	10,2	0,02	0,0094	0,125
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	10,7	0,004	–	10,7	0,01	0,0095	0,132
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	11,0	0,001	–	11,0	0,00	0,0096	0,137
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	11,0	0,001	–	11,0	0,00	0,0096	0,137
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	11,0	0,001	–	11,0	0,00	0,0096	0,137
15	465–1000 *эв*	0,77	11,1	0,001	–	11,1	0,00	0,0096	0,138
16	215–465 *эв*	0,77	11,2	0,002	–	11,2	0,00	0,0096	0,140
17	100–215 *эв*	0,77	11,3	0,002	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
18	46,5–100 *эв*	0,77	11,3	0,003	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	11,3	0,005	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	11,3	0,007	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
21	4,65–10 *эв*	0,77	11,3	0,010	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	11,3	0,015	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	11,3	0,022	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	11,3	0,033	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	11,3	0,048	–	11,3	0,00	0,0096	0,141
T	0,0252 *эв*	–	11,5	0,170	–	11,3	0,00	0,0096	0,141

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,01	0,09	0,35	0,83	0,78	0,55	0,20	0,07	0,02
2	0,06	0,26	0,61	0,55	0,40	0,15	0,05	0,02	–
3	0,21	0,35	0,27	0,24	0,11	0,04	0,01	–	–
4	0,15	0,26	0,10	0,04	–	–	–	–	–
5	0,00	0,13	0,11	0,04	0,01	–	–	–	–
6	0,00	0,00	0,00	0,01	–	–	–	–	–

i	f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
	∞	10^2	10	0	∞	10^2	10	0	∞	10^2	10	0
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	1,00	1,00	1,00	0,99
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,92	1,00	1,00	0,99	0,98
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,89	1,00	1,00	0,98	0,94
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,91	1,00	1,00	0,98	0,94
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	0,99	0,97

Висмут (Bi)

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	5,30	0,001	2,50	2,80	0,82	0,0017	0,024
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,20	0,001	2,15	5,05	0,72	0,0027	0,046
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,40	0,0015	1,25	6,15	0,50	0,0048	0,073
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	6,00	0,002	0,53	5,47	0,31	0,0066	0,063
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	5,00	0,0025	0,10	4,90	0,21	0,0075	0,064
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	6,00	0,0025	0,00	6,00	0,14	0,0082	0,071

7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	7,50	0,0025	–	7,50	0,10	0,0086	0,093
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	9,00	0,0025	–	9,00	0,07	0,0088	0,115
9	46,5–100 *кэв*	0,77	10,0	0,002	–	10,0	0,05	0,0090	0,117
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	11,5	0,002	–	11,5	0,02	0,0093	0,139
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	16,0	0,002	–	16,0	0,00	0,0095	0,197
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	9,5	0,005	–	9,5	0,00	0,0095	0,117
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	17,5	0,023	–	17,5	0,00	0,0095	0,216
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	9,5	0,0015	–	9,5	0,00	0,0095	0,117
15	465–1000 *эв*	0,77	220	0,190	–	220	0,00	0,0095	2,17
16	215–465 *эв*	0,77	8,80	0,0007	–	8,80	0,00	0,0095	0,109
17	100–215 *эв*	0,77	9,00	0,0006	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
18	46,5–100 *эв*	0,77	9,00	0,0007	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	9,00	0,0010	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	9,00	0,0014	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
21	4,65–10 *эв*	0,77	9,00	0,0021	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	9,00	0,0030	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	9,00	0,0044	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	9,01	0,0065	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	9,01	0,0095	–	9,00	0,00	0,0095	0,111
T	0,0252 *эв*	–	9,03	0,034	–	9,00	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,05	0,25	0,25	0,84	0,66	0,26	0,10	0,03
2	0,04	0,24	0,60	0,60	0,43	0,18	0,05	0,01	–
3	0,10	0,74	0,18	0,18	0,06	0,02	0,01	–	–
4	0,08	0,24	0,17	0,17	0,01	–	–	–	–
5	0,00	0,06	0,03	0,03	–	–	–	–	–

i	f_c при σ_0, равной					f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
	∞	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,92	1,00	1,00	0,99	0,97
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,85	1,00	1,00	0,99	0,94
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,94	0,78	1,00	1,00	0,98	0,89
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,89	0,70	1,00	1,0	0,93	0,81
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,89	0,81	0,62	1,00	0,99	0,86	0,74
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,81	0,71	0,56	0,99	0,95	0,79	0,67
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87	0,71	0,61	0,48	0,98	0,90	0,71	0,61
12	1,00	0,95	0,78	0,65	0,62	0,97	0,92	0,89	0,87	0,99	0,95	0,91	0,90
13	1,00	0,80	0,42	0,21	0,18	0,83	0,61	0,49	0,44	0,90	0,70	0,56	0,51
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,00	0,62	0,26	0,13	0,10	0,58	0,38	0,29	0,24	0,71	0,47	0,35	0,30

Торий (Th^{232})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	0,32	3,03	0,01	0,01	3,50	0,84	0,0014	0,025
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,50	0,15	2,64	0,02	0,02	4,40	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	0,13	2,43	0,04	0,04	4,50	0,71	0,0025	0,028
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	6,70	0,08	2,21	0,08	0,08	3,90	0,53	0,0040	0,028
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,90	0,00	–	0,14	0,14	4,60	0,42	0,0050	0,040
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,60	–	–	0,17	0,17	5,83	0,33	0,0058	0,049
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,70	–	–	0,19	0,19	8,51	0,21	0,0068	0,084
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	–	–	0,27	0,27	10,7	0,12	0,076	0,118
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,7	–	–	0,42	0,42	12,1	0,07	0,0080	0,126
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	13,6	–	–	0,56	0,56	13,0	0,04	0,0083	0,140
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	14,5	–	–	0,75	0,75	13,7	0,02	0,0084	0,149
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	15,0	–	–	1,35	1,35	13,6	0,01	0,0085	0,150
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	16,0	–	–	2,10	2,10	13,9	0,00	0,0086	0,155
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	18,0	–	–	3,30	3,30	14,7	0,00	0,0086	0,164
15	465–1000 *эв*	0,77	23,0	–	–	5,00	5,00	18,0	0,00	0,0086	0,201
16	215–465 *эв*	0,77	33,0	–	–	11,0	11,0	22,0	0,00	0,0086	0,246
17	100–215 *эв*	0,77	41,0	–	–	19,0	19,0	22,0	0,00	0,0086	0,246
18	46,5–100 *эв*	0,77	60,0	–	–	28,0	28,0	32,0	0,00	0,0086	0,357
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	64,0	–	–	47,0	47,0	17,0	0,00	0,0086	0,190
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	23,5	–	–	12,0	12,0	11,5	0,00	0,0086	0,128
21	4,65–10 *эв*	0,77	12,5	–	–	0,46	0,46	12,0	0,00	0,0086	0,134
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	12,7	–	–	0,67	0,67	12,0	0,00	0,0086	0,134
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	13,0	–	–	0,99	0,99	12,0	0,00	0,0086	0,134
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	13,5	–	–	1,45	1,45	12,0	0,00	0,0086	0,134
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	14,1	–	–	2,11	2,11	12,0	0,00	0,0086	0,134
T	0,0252 *эв*	–	19,6	–	–	7,56	7,56	12,0	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,02	0,14	0,57	0,91	1,03	0,58	0,22	0,06	0,02
2	0,02	0,11	0,47	0,83	0,85	0,45	0,14	0,05	0,01	–
3	0,06	0,34	0,77	0,99	0,55	0,23	0,07	0,02	–	–
4	0,19	0,90	1,02	0,36	0,12	0,04	0,01	–	–	–
5	1,00	0,70	0,31	0,11	0,03	0,01	–	–	–	–
6	1,25	0,33	0,02	0,00	0,00	–	–	–	–	–
7	0,68	0,30	0,02	0,00	–	–	–	–	–	–
8	0,27	0,23	0,00	–	–	–	–	–	–	–
9	0,06	0,08	0,03	–	–	–	–	–	–	–

i	$T,^oK$	f_c при σ_0, равной						f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
		∞	10^4	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**
9	300	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	900	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

	300	1,00	1,00	0,99	0,98	0,95	0,92	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
10	900	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,98	0,97	0,86	0,78	1,00	0,98	0,94	0,92	1,00	0,99	0,97	0,96
11	900	1,00	1,00	1,00	0,98	0,93	0,88	1,00	1,00	0,99	0,95	1,00	1,00	0,99	0,98
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,97	0,92	0,72	0,61	0,99	0,94	0,85	0,76	0,99	0,97	0,92	0,78
12	900	1,00	1,00	1,00	0,95	0,82	0,73	1,00	0,98	0,89	0,78	1,00	0,99	0,95	0,82
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	0,94	0,87	1,00	1,00	0,95	0,82	1,00	1,00	0,98	0,86
	300	1,00	1,00	0,95	0,80	0,54	0,43	0,97	0,86	0,73	0,65	0,99	0,93	0,84	0,70
13	900	1,00	1,00	0,98	0,87	0,64	0,51	0,99	0,90	0,76	0,68	0,99	0,96	0,88	0,73
	2100	1,00	1,00	0,99	0,94	0,74	0,62	1,00	0,95	0,80	0,71	1,00	0,99	0,92	0,76
	300	1,00	0,99	0,92	0,62	0,35	0,27	0,93	0,73	0,63	0,58	0,98	0,86	0,75	0,65
14	900	1,00	1,00	0,97	0,72	0,42	0,35	0,97	0,78	0,64	0,60	0,99	0,89	0,78	0,67
	2100	1,00	1,00	0,99	0,82	0,53	0,44	1,00	0,83	0,65	0,62	1,00	0,94	0,82	0,70
	300	1,00	0,97	0,87	0,45	0,19	0,14	0,86	0,59	0,51	0,46	0,94	0,78	0,66	0,60
15	900	1,00	0,98	0,92	0,55	0,25	0,19	0,91	0,62	0,52	0,47	0,97	0,80	0,69	0,62
	2100	1,00	0,99	0,96	0,64	0,32	0,23	0,96	0,65	0,63	0,49	0,99	0,86	0,73	0,64
	300	1,00	0,93	0,62	0,26	0,12	0,085	0,70	0,45	0,32	0,24	0,74	0,56	0,49	0,41
16	900	1,00	0,95	0,72	0,33	0,16	0,11	0,78	0,48	0,33	0,25	0,77	0,57	0,49	0,42
	2100	1,00	0,97	0,81	0,40	0,19	0,14	0,90	0,55	0,34	0,26	0,82	0,63	0,50	0,43
	300	1,00	0,89	0,45	0,17	0,079	0,059	0,58	0,31	0,28	0,22	0,70	0,55	0,50	0,45
17	900	1,00	0,93	0,51	0,20	0,10	0,070	0,67	0,33	0,29	0,22	0,75	0,57	0,50	0,47
	2100	1,00	0,98	0,60	0,24	0,13	0,078	0,72	0,35	0,30	0,23	0,80	0,59	0,52	0,49
	300	1,00	0,78	0,28	0,097	0,045	0,038	0,32	0,20	0,18	0,15	0,49	0,38	0,34	0,32
18	900	1,00	0,84	0,30	0,11	0,050	0,043	0,35	0,21	0,18	0,16	0,49	0,38	0,35	0,33
	2100	1,00	0,88	0,33	0,12	0,056	0,046	0,37	0,21	0,18	0,16	0,50	0,39	0,35	0,34
	300	1,00	0,83	0,30	0,11	0,051	0,038	0,45	0,25	0,23	0,20	0,79	0,68	0,65	0,62
19	900	1,00	0,87	0,32	0,11	0,055	0,039	0,50	0,28	0,24	0,20	0,83	0,69	0,66	0,62
	2100	1,00	0,92	0,35	0,12	0,058	0,041	0,55	0,32	0,26	0,21	0,86	0,70	0,66	0,63
	300	1,00	0,85	0,32	0,12	0,056	0,040	0,58	0,48	0,47	0,45	1,0	1,0	1,0	1,0
20	900	1,00	0,92	0,38	0,14	0,062	0,042	0,62	0,51	0,47	0,46	1,0	1,0	1,0	1,0
	2100	1,00	0,94	0,42	0,16	0,067	0,044	0,66	0,54	0,48	0,46	1,0	1,0	1,0	1,0

Уран (U^{233})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	2,10	3,37	0,01	0,85	0,0013	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,40	1,60	3,02	0,02	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	1,85	2,78	0,03	0,71	0,0025	0,028
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,00	1,93	2,63	0,04	0,55	0,0039	0,027
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,60	1,93	2,58	0,07	0,45	0,0047	0,030
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,40	2,05	2,54	0,12	0,35	0,0056	0,037
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,20	2,30	2,51	0,20	0,23	0,0066	0,060
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	10,6	2,40	2,50	0,26	0,13	0,0075	0,083
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,1	2,80	2,49	0,34	0,07	0,0080	0,092
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	13,2	3,50	2,49	0,60	0,04	0,0084	0,097
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	15,0	4,60	2,49	0,85	0,02	0,0085	0,104
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	17,3	6,60	2,49	1,40	0,01	0,0086	0,103
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	20,5	7,70	2,49	1,80	0,00	0,0086	0,123
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	23,0	8,80	2,49	2,20	0,00	0,0086	0,134
15	465–1000 *эв*	0,77	28,5	12	2,49	3,50	0,00	0,0086	0,145
16	215–465 *эв*	0,77	35,4	16	2,49	6,40	0,00	0,0086	0,145
17	100–215 *эв*	0,77	48	25	2,49	10,0	0,00	0,0086	0,145
18	46,5–100 *эв*	0,77	57	32	2,49	12,0	0,00	0,0086	0,145
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	94	65	2,49	16,0	0,00	0,0086	0,145
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	154	110	2,49	31	0,00	0,0086	0,145
21	4,65–10 *эв*	0,77	128	94	2,49	22	0,00	0,0086	0,140
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	177	126	2,49	39	0,00	0,0086	0,140
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	422	350	2,49	60	0,00	0,0086	0,140
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	147	124	2,49	10,5	0,00	0,0086	0,140
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	191	165	2,49	14	0,00	0,0086	0,140
T	0,0252 *эв*	–	590	525	2,49	53	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,00	0,04	0,16	0,28	0,34	0,20	0,08	0,03	0,01
2	0,01	0,06	0,23	0,42	0,41	0,22	0,09	0,03	0,01	–
3	0,05	0,16	0,32	0,41	0,24	0,10	0,03	0,01	–	–
4	0,08	0,19	0,42	0,27	0,12	0,04	0,01	–	–	–
5	0,20	0,33	0,22	0,10	0,04	0,01	–	–	–	–
6	0,29	0,25	0,08	0,03	0,01	–	–	–	–	–
7	0,23	0,12	0,03	0,02	–	–	–	–	–	–
8	0,17	0,12	–	–	–	–	–	–	–	–
9	0,06	0,04	0,02	–	–	–	–	–	–	–

i	*T*,^{o}K	f_f при σ_0, равной				f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной			f_e при σ_e, равной		
		10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^2	10	0	10^2	10	0
	300	1,00	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99	0,96	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
11	900	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,98	0,95	1,00	1,00	0,97	0,94	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
12	900	1,00	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99	0,96	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,96	0,92	1,00	0,99	0,94	0,90	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	1,00
13	900	1,00	1,00	0,97	0,95	1,00	0,99	0,96	0,94	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,98	0,91	0,88	1,00	0,97	0,88	0,85	0,99	0,94	0,92	1,00	1,00	1,00
14	900	1,00	0,99	0,95	0,92	1,00	0,98	0,93	0,90	1,00	0,96	0,94	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	0,99	0,97	0,95	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	1,00
	300	0,99	0,95	0,87	0,84	0,99	0,93	0,83	0,78	0,95	0,86	0,84	1,00	1,00	1,00
15	900	1,00	0,98	0,91	0,88	1,00	0,96	0,87	0,82	0,98	0,92	0,90	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,99	0,96	0,92	1,00	0,98	0,92	0,87	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	1,00
	300	0,98	0,92	0,82	0,78	0,98	0,88	0,75	0,70	0,89	0,79	0,75	1,00	1,00	1,00
16	900	1,00	0,95	0,85	0,81	1,00	0,91	0,78	0,74	0,95	0,85	0,82	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,98	0,88	0,84	1,00	0,94	0,81	0,78	0,99	0,91	0,89	1,00	1,00	1,00
	300	0,96	0,87	0,76	0,71	0,96	0,84	0,69	0,63	0,82	0,70	0,65	1,00	1,00	1,00
17	900	0,99	0,90	0,80	0,75	0,99	0,87	0,73	0,68	0,88	0,76	0,72	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,93	0,84	0,79	1,00	0,90	0,77	0,72	0,85	0,82	0,79	1,00	1,00	1,00
	300	0,94	0,82	0,70	0,64	0,94	0,78	0,62	0,56	0,74	0,60	0,55	1,00	1,00	1,00
18	900	0,97	0,86	0,73	0,67	0,97	0,82	0,66	0,61	0,78	0,65	0,60	1,00	1,00	1,00
	2100	0,99	0,91	0,76	0,70	0,99	0,87	0,69	0,64	0,83	0,70	0,65	1,00	1,00	1,00
	300	0,92	0,76	0,63	0,57	0,91	0,73	0,56	0,49	0,65	0,50	0,43	1,00	1,00	1,00
19	900	0,95	0,78	0,66	0,59	0,94	0,75	0,59	0,51	0,68	0,52	0,45	1,00	1,00	1,00
	2100	0,98	0,81	0,69	0,61	0,98	0,78	0,62	0,54	0,70	0,54	0,47	1,00	1,00	1,00
	300	0,90	0,71	0,57	0,50	0,88	0,67	0,48	0,41	0,56	0,37	0,33	1,00	1,00	1,00
20	900	0,91	0,73	0,59	0,51	0,89	0,69	0,50	0,42	0,58	0,39	0,34	1,00	1,00	1,00
	2100	0,93	0,75	0,61	0,52	0,91	0,71	0,52	0,43	0,61	0,42	0,36	1,00	1,00	1,00

	300	0,91	0,79	0,68	0,65	0,90	0,74	0,65	0,64	0,70	0,59	0,56	1,00	1,00	1,00
21	900	0,91	0,79	0,68	0,65	0,90	0,74	0,65	0,65	0,70	0,60	0,56	1,00	1,00	1,00
	2100	0,91	0,80	0,69	0,66	0,91	0,75	0,67	0,66	0,71	0,61	0,57	1,00	1,00	1,00
	300	0,90	0,73	0,65	0,64	0,78	0,48	0,40	0,32	0,56	0,52	0,50	1,00	1,00	1,00
22	900	0,90	0,73	0,65	0,64	0,78	0,48	0,40	0,32	0,56	0,52	0,50	1,00	1,00	1,00
	2100	0,90	0,73	0,65	0,64	0,78	0,48	0,40	0,32	0,56	0,52	0,50	1,00	1,00	1,00
	300	0,92	0,78	0,76	0,76	0,89	0,73	0,67	0,66	0,66	0,62	0,61	1,00	1,00	1,00
23	900	0,92	0,78	0,76	0,76	0,89	0,73	0,67	0,66	0,66	0,62	0,61	1,00	1,00	1,00
	2100	0,92	0,78	0,76	0,76	0,89	0,73	0,67	0,66	0,66	0,62	0,61	1,00	1,00	1,00

Уран (U^{234})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	2,00	3,37	0,00	0,80	3,50	0,84	0,0014	0,025
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,50	1,55	3,01	0,02	1,53	4,40	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	1,52	2,77	0,04	1,64	4,50	0,71	0,0025	0,028
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	6,80	1,43	2,62	0,08	1,29	4,00	0,53	0,0040	0,028
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,00	1,22	2,51	0,25	1,17	4,36	0,42	0,0049	0,037
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,60	0,70	2,44	0,25	1,20	5,45	0,33	0,0057	0,045
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,70	0,12	2,41	0,30	0,97	8,31	0,21	0,0067	0,081
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	0,04	2,39	0,45	0,52	10,5	0,12	0,0075	0,114
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,5	0,03	2,38	0,55	0,17	11,8	0,07	0,0079	0,121
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	13,5	0,02	2,37	0,75	0,00	12,7	0,04	0,0082	0,135
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	14,5	0,02	2,37	1,00	–	13,5	0,02	0,0083	0,145
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	15,5	0,02	2,37	1,40	–	14,1	0,01	0,0084	0,154
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	17,0	–	–	2,20	–	14,8	0,00	0,0085	0,163
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	20,0	–	–	3,50	–	16,5	0,00	0,0085	0,182
15	465–1000 *эв*	0,77	25,0	–	–	5,50	–	19,5	0,00	0,0085	0,215
16	215–465 *эв*	0,77	44,0	–	–	8,00	–	36,0	0,00	0,0085	0,397
17	100–215 *эв*	0,77	50,0	–	–	21,0	–	29,0	0,00	0,0085	0,320
18	46,5–100 *эв*	0,77	47,0	–	–	30,0	–	17,0	0,00	0,0085	0,188
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	43,0	–	–	33,0	–	10,0	0,00	0,0085	0,110
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	10,2	–	–	0,20	–	10,0	0,00	0,0085	0,110
21	4,65–10 *эв*	0,77	860	–	–	735	–	125	0,00	0,0085	1,38
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	19,5	–	–	9,00	–	10,5	0,00	0,0085	0,116
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	17,2	–	–	7,20	–	10,0	0,00	0,0085	0,110
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	28,5	–	–	18,5	–	10,0	0,00	0,0085	0,110
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	54,6	–	–	44,6	–	10,0	0,00	0,0085	0,110
T	0,0252 *эв*	–	115	–	–	105	–	10,0	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,00	0,04	0,19	0,28	0,29	0,15	0,06	0,02
2	0,01	0,06	0,24	0,43	0,45	0,23	0,08	0,02	0,01
3	0,04	0,18	0,42	0,54	0,29	0,12	0,04	0,01	–
4	0,09	0,38	0,49	0,22	0,08	0,03	–	–	–
5	0,58	0,33	0,17	0,07	0,02	–	–	–	–
6	0,94	0,25	0,01	–	–	–	–	–	–
7	0,67	0,28	0,02	–	–	–	–	–	–
8	0,29	0,23	–	–	–	–	–	–	–
9	0,06	0,08	0,03	–	–	–	–	–	–

i	T,°K	f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной			f_e при σ_e, равной		
		10^5	10^4	10^3	10^2	10^4	10^3	10^2	10^3	10^2	10
	300	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99
11	900	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,97	0,92	1,00	0,99	0,94	1,00	0,99	0,97
12	900	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,95	0,80	1,00	0,97	0,86	1,00	0,99	0,93
13	900	1,00	1,00	0,98	0,87	1,00	0,99	0,90	1,00	0,99	0,96
	2100	1,00	1,00	0,99	0,94	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,99
	300	1,00	0,99	0,92	0,62	1,00	0,93	0,73	1,00	0,98	0,86
14	900	1,00	0,00	0,97	0,72	1,00	0,97	0,78	1,00	0,99	0,89
	2100	1,00	1,00	0,99	0,82	1,00	1,00	0,83	1,00	1,00	0,94
	300	1,00	0,97	0,87	0,45	1,00	0,86	0,59	1,00	0,94	0,78
15	900	1,00	0,98	0,92	0,55	1,00	0,91	0,62	1,00	0,97	0,80
	2100	1,00	0,99	0,96	0,64	1,00	0,96	0,65	1,00	0,99	0,8
	300	1,00	0,92	0,58	0,20	0,84	0,50	0,29	0,92	0,65	0,40
16	900	1,00	0,95	0,67	0,25	0,87	0,58	0,30	0,95	0,71	0,44
	2100	1,00	0,96	0,74	0,31	0,91	0,66	0,32	0,96	0,77	0,48
	300	1,00	0,91	0,59	0,21	0,82	0,44	0,23	0,90	0,61	0,36
17	900	1,00	0,94	0,68	0,26	0,87	0,51	0,24	0,93	0,66	0,39
	2100	1,00	0,96	0,76	0,35	0,91	0,62	0,27	0,95	0,73	0,43
	300	0,98	0,86	0,45	0,13	0,82	0,37	0,22	0,91	0,64	0,45
18	900	0,99	0,91	0,54	0,17	0,87	0,43	0,23	0,94	0,70	0,50
	2100	0,99	0,94	0,62	0,21	0,94	0,50	0,24	0,96	0,71	0,50

	300	0,96	0,72	0,27	0,083	0,61	0,29	0,22	0,86	0,64	0,54
19	900	0,97	0,76	0,30	0,085	0,70	0,30	0,22	0,88	0,65	0,54
	2100	0,98	0,82	0,39	0,099	0,79	0,34	0,23	0,91	0,69	0,55
	300	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	900	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	0,91	0,55	0,16	0,058	0,37	0,081	0,043	0,58	0,22	0,13
21	900	0,94	0,64	0,20	0,070	0,47	0,091	0,044	0,67	0,26	0,14
	2100	0,96	0,76	0,31	0,097	0,60	0,14	0,049	0,77	0,36	0,16

Уран (U^{235})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	1,75	3,40	0,02	1,03	3,50	0,84	0,0013	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,40	1,15	3,04	0,03	1,92	4,30	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	1,25	2,79	0,04	1,91	4,50	0,71	0,0024	0,027
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,00	1,28	2,63	0,06	1,76	3,90	055	0,0038	0,026
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,60	1,25	2,52	0,12	1,38	3,85	0,45	0,0046	0,031
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,40	1,23	2,46	0,17	1,20	4,80	0,35	0,0054	0,038
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,20	1,41	2,47	0,25	1,00	6,54	0,23	0,0064	0,061
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,2	1,70	2,45	0,40	0,60	8,50	0,13	0,0073	0,090
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,5	2,10	2,44	0,60	0,18	9,62	0,07	0,0078	0,097
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	14,0	2,65	2,43	1,00	0,06	10,3	0,04	0,0081	0,108
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	16,0	3,40	2,42	1,50	–	11,1	0,02	0,0082	0,118
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	19,0	4,40	2,42	2,10	–	12,5	0,01	0,0083	0,135
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	23,0	5,40	2,42	2,75	–	14,8	0,00	0,0084	0,161
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	27,0	7,30	2,42	3,80	–	15,9	0,00	0,0084	0,174
15	465–1000 *эв*	0,77	32,0	11,0	2,42	6,3	–	14,7	0,00	0,0084	0,160
16	215–465 *эв*	0,77	38,0	16,0	2,42	9,5	–	12,5	0,00	0,0084	0,136
17	100–215 *эв*	0,77	47,7	22	2,42	13,5	–	12,2	0,00	0,0084	0,133
18	46,5–100 *эв*	0,77	69,0	35	2,42	22	–	12	0,00	0,0084	0,131
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	88,0	45	2,42	31	–	12	0,00	0,0084	0,131
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	111	45	2,42	54	–	12	0,00	0,0084	0,131
21	4,65–10 *эв*	0,77	93,0	37	2,42	44	–	12	0,00	0,0084	0,131
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	39,0	20	2,42	7	–	12	0,00	0,0084	0,131
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	61,0	35	2,42	13	–	13	0,00	0,0084	0,142
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	88,0	64	2,42	10	–	14	0,00	0,0084	0,153
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	205	155	2,42	35	–	15	0,00	0,0084	0,164
T	0,0252 *эв*	–	698	582	2,42	101	–	15	0,00	0,0084 –	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при k, равном									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,01	0,05	0,25	0,43	0,56	0,35	0,14	0,04	0,01
2	0,02	0,08	0,35	0,54	0,51	0,26	0,11	0,04	0,01	–
3	0,10	0,27	0,53	0,54	0,30	0,12	0,04	0,01	–	–
4	0,20	0,35	0,57	0,40	0,16	0,06	0,02	–	–	–
5	0,20	0,51	0,37	0,20	0,08	0,02	–	–	–	–
6	0,44	0,44	0,22	0,08	0,02	–	–	–	–	–
7	0,61	0,38	0,01	–	–	–	–	–	–	–
8	0,21	0,29	0,08	0,02	–	–	–	–	–	–
9	0,09	0,07	0,02	–	–	–	–	–	–	–
10	0,05	0,01	–	–	–	–	–	–	–	–

i	T,°K	f_f при σ_0, равной				f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной			f_e при σ_e, равной		
		10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^2	10	0	10^2	10	0
	300	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00
11	900	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,99	0,96	0,94	1,00	0,99	0,96	0,94	1,00	0,98	0,96	1,00	1,00	0,99
12	900	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,99	0,93	0,89	1,00	0,99	0,93	0,89	0,99	0,96	0,93	1,00	0,99	0,98
13	900	1,00	1,00	0,97	0,94	1,00	1,00	0,97	0,94	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99
	2100	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,97	0,88	0,82	1,00	0,97	0,88	0,82	0,96	0,92	0,88	0,99	0,98	0,96
14	900	1,00	0,99	0,95	0,91	1,00	0,99	0,95	0,91	0,99	0,97	0,94	1,00	0,99	0,97
	2100	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,98
	300	1,00	0,94	0,82	0,75	1,00	0,94	0,81	0,74	0,93	0,88	0,82	1,00	0,97	0,95
15	900	1,00	0,97	0,92	0,86	1,00	0,97	0,92	0,85	0,97	0,95	0,93	1,00	0,99	0,97
	2100	1,00	0,99	0,97	0,93	1,00	0,99	0,97	0,93	0,99	0,98	0,97	1,00	1,00	0,99
	300	0,99	0,90	0,75	0,67	0,99	0,89	0,74	0,65	0,85	0,78	0,73	1,00	1,00	1,00
16	900	1,00	0,95	0,87	0,81	1,00	0,95	0,86	0,80	0,94	0,89	0,86	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,98	0,93	0,89	1,00	0,98	0,93	0,88	0,98	0,95	0,93	1,00	1,00	1,00
	300	0,97	0,83	0,67	0,60	0,97	0,81	0,64	0,56	0,80	0,70	0,62	1,00	1,00	1,00
17	900	0,99	0,90	0,81	0,75	0,99	0,89	0,79	0,72	0,87	0,83	0,77	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,97	0,93	0,88	1,00	0,97	0,92	0,86	0,94	0,91	0,90	1,00	1,00	1,00

	300	0,95	0,77	0,61	0,55	0,94	0,74	0,56	0,48	0,70	0,56	0,50	1,00	1,00	1,00
18	900	0,97	0,82	0,71	0,64	0,96	0,80	0,68	0,59	0,75	0,64	0,58	1,00	1,00	1,00
	2100	0,99	0,87	0,80	0,73	0,98	0,86	0,78	0,70	0,80	0,72	0,66	1,00	1,00	1,00
	300	0,91	0,70	0,56	0,52	0,90	0,65	0,48	0,43	0,57	0,42	0,39	1,00	1,00	1,00
19	900	0,93	0,73	0,60	0,56	0,92	0,67	0,52	0,47	0,59	0,45	0,42	1,00	1,00	1,00
	2100	0,95	0,76	0,64	0,60	0,94	0,70	0,56	0,51	0,61	0,48	0,45	1,00	1,00	1,00
	300	0,88	0,64	0,52	0,49	0,86	0,58	0,42	0,38	0,46	0,36	0,32	1,00	1,00	1,00
20	900	0,90	0,66	0,53	0,50	0,88	0,60	0,43	0,39	0,47	0,37	0,33	1,00	1,00	1,00
	2100	0,91	0,67	0,53	0,51	0,90	0,62	0,44	0,40	0,48	0,38	0,34	1,00	1,00	1,00
	300	0,86	0,62	0,50	0,47	0,83	0,55	0,40	0,35	0,42	0,31	0,29	1,00	1,00	1,00
21	900	0,87	0,63	0,50	0,47	0,84	0,56	0,41	0,36	0,43	0,32	0,29	1,00	1,00	1,00
	2100	0,88	0,64	0,51	0,48	0,85	0,57	0,42	0,37	0,44	0,32	0,30	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,90	0,79	0,74	0,97	0,81	0,62	0,56	0,82	0,68	0,64	1,00	1,00	1,00
22	900	1,00	0,90	0,79	0,74	0,97	0,81	0,62	0,56	0,82	0,68	0,64	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,90	0,79	0,74	0,97	0,81	0,62	0,56	0,82	0,68	0,64	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,87	0,74	0,70	1,00	0,86	0,69	0,64	0,80	0,65	0,63	1,00	1,00	1,00
23	900	1,00	0,87	0,74	0,70	1,00	0,87	0,74	0,70	0,80	0,65	0,63	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	0,87	0,74	0,70	1,00	0,87	0,74	0,70	0,80	0,65	0,63	1,00	1,00	1,00

Уран (U^{236})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	1,50	3,42	0,01	1,29	3,50	0,84	0,0014	0,025
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,50	0,92	3,04	0,02	2,16	4,40	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	0,90	2,83	0,05	2,25	4,50	0,71	0,0025	0,028
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,10	0,77	2,63	0,09	1,94	4,30	0,54	0,0040	0,030
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,90	0,42	2,54	0,33	1,70	4,45	0,43	0,0048	0,037
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,80	0,03	2,46	0,30	1,54	5,93	0,333	0,0056	0,048
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,60	–	–	0,33	1,00	8,27	0,21	0,0066	0,079
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	–	–	0,40	0,52	10,6	0,12	0,0074	0,114
9	46,5–100 *кэв*	0,77	13,0	–	–	0,60	0,18	12,2	0,07	0,0078	0,124
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	14,0	–	–	0,80	0,00	13,2	0,04	0,0081	0,139
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	14,5	–	–	1,10	–	13,4	0,02	0,0082	0,143
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	16,0	–	–	1,60	–	14,4	0,01	0,0083	0,155
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	18,0	–	–	2,50	–	15,5	0,00	0,0084	0,169
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	21,5	–	–	4,00	–	17,5	0,00	0,0084	0,191
15	465–1000 *эв*	0,77	29,0	–	–	6,00	–	23,0	0,00	0,0084	0,251
16	215–465 *эв*	0,77	47,0	–	–	10,0	–	37,0	0,00	0,0084	0,404
17	100–215 *эв*	0,77	51,0	–	–	14,5	–	36,5	0,00	0,0084	0,398

18	46,5–100 *эв*	0,77	82,0	–	–	30,0	–	52,0	0,00	0,0084	0,567
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	76,0	–	–	45,0	–	31,0	0,00	0,0084	0,338
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	10,1	–	–	0,10	–	10,0	0,00	0,0084	0,109
21	4,65–10 *эв*	0,77	330	–	–	300	–	30,0	0,00	0,0084	0,327
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	12,8	–	–	2,80	–	10,0	0,00	0,0084	0,109
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	11,3	–	–	1,30	–	10,0	0,00	0,0084	0,109
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	11,6	–	–	1,60	–	10,0	0,00	0,0084	0,109
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	12,2	–	–	2,20	–	10,0	0,00	0,0084	0,109
T	0,0252 *эв*	–	17,0	–	–	7,00	–	10,0	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,01	0,07	0,30	0,47	0,51	0,28	0,11	0,03	0,01
2	0,02	0,09	0,34	0,60	0,64	0,32	0,11	0,03	0,01	–
3	0,05	0,25	0,57	0,74	0,40	0,17	0,05	0,02	–	–
4	0,14	0,58	0,74	0,33	0,11	0,04	–	–	–	–
5	0,84	0,47	0,26	0,10	0,03	–	–	–	–	–
6	1,21	0,30	0,02	0,01	–	–	–	–	–	–
7	0,69	0,29	0,02	–	–	–	–	–	–	–
8	0,29	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–
9	0,07	0,08	0,03	–	–	–	–	–	–	–

i	***T*,°K**	f_c **при** σ_0**, равной**				f_t **при** σ_0**, равной**			f_e **при** σ_e**, равной**		
		10^5	10^4	10^3	10^2	10^4	10^3	10^2	10^4	10^3	10^2
	300	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99
11	900	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,97	0,92	1,00	0,99	0,94	1,00	0,99	0,97
12	900	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99
	2100	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	0,95	0,80	1,00	0,97	0,86	1,00	0,99	0,93
13	900	1,00	1,00	0,98	0,87	1,00	0,99	0,90	1,00	0,99	0,96
	2100	1,00	1,00	0,99	0,94	1,00	1,00	0,95	100	1,00	0,99
	300	1,00	0,99	0,92	0,62	1,00	0,93	0,73	1,00	0,98	0,86
14	900	1,00	1,00	0,97	0,72	1,00	0,97	0,78	1,00	0,99	0,89
	2100	1,00	1,00	0,99	0,82	1,00	1,00	0,83	1,00	1,00	0,94
	300	1,00	0,97	0,87	0,45	1,00	0,86	0,59	1,00	0,94	0,78
15	900	1,00	0,98	0,92	0,55	1,00	0,91	0,62	1,00	0,97	0,80
	2100	1,00	0,99	0,96	0,64	1,00	0,96	0,65	1,00	0,99	0,86

	300	1,00	0,89	0,49	0,15	0,82	0,45	0,28	0,91	0,62	0,38
16	900	1,00	0,92	0,57	0,18	0,87	0,52	0,28	0,94	0,68	0,40
	2100	1,00	0,95	0,66	0,23	0,90	0,60	0,29	0,96	0,75	0,43
	300	0,99	0,87	0,49	0,17	0,78	0,40	0,25	0,89	0,58	0,36
17	900	1,00	0,91	0,56	0,20	0,85	0,45	0,26	0,92	0,63	0,38
	2100	1,00	0,94	0,64	0,26	0,89	0,52	0,27	0,95	0,69	0,41
	300	0,97	0,76	0,30	0,083	0,67	0,24	0,16	0,81	0,44	0,26
18	900	0,97	0,82	0,37	0,10	0,79	0,27	0,16	0,86	0,45	0,27
	2100	0,99	0,87	0,45	0,12	0,85	0,32	0,16	0,90	0,56	0,29
	300	0,97	0,76	0,39	0,13	0,73	0,31	0,18	0,79	0,52	0,38
19	900	0,99	0,85	0,46	0,16	0,81	0,36	0,18	0,88	0,57	0,39
	2100	0,99	0,90	0,56	0,21	0,88	0,41	0,19	0,92	0,64	0,42
	300	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	900	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	0,94	0,65	0,23	0,080	0,46	0,13	0,073	0,73	0,46	0,36
21	900	0,95	0,70	0,28	0,088	0,60	0,14	0,074	0,77	0,48	0,36
	2100	0,97	0,77	0,34	0,096	0,72	0,16	0,074	0,81	0,53	0,37

Уран (U^{238})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	1,00	3,48	0,00	1,80	3,50	0,84	0,0013	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,50	0,58	3,09	0,01	2,51	4,40	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	0,58	2,87	0,02	2,60	4,50	0,71	0,0024	0,027
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,10	0,49	2,67	0,06	2,25	4,30	0,53	0,0039	0,029
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,90	0,02	2,58	0,13	2,15	4,60	0,42	0,0049	0,040
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	7,80	–	–	0,13	1,65	6,02	0,33	0,0056	0,049
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,60	–	–	0,15	1,05	8,40	0,21	0,0066	0,080
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	–	–	0,22	0,55	10,7	0,12	0,0074	0,115
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,8	–	–	0,35	0,19	12,3	0,07	0,0078	0,125
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	13,5	–	–	0,46	–	13,0	0,02	0,0081	0,137
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	14,0	–	–	0,60	–	13,4	0,01	0,0082	0,143
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	15,5	–	–	0,78	–	14,7	0,00	0,0083	0,158
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	16,5	–	–	1,20	–	15,3	0,00	0,0084	0,167
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	18,0	–	–	2,10	–	15,9	0,00	0,0084	0,174
15	465–1000 *эв*	0,77	23,0	–	–	3,60	–	19,4	0,00	0,0084	0,212
16	215–465 *эв*	0,77	18,5	–	–	4,50	–	14,0	0,00	0,0084	0,153
17	100–215 *эв*	0,77	80,0	–	–	17,0	–	63,0	0,00	0,0084	0,687

18	46,5–100 *эв*	0,77	40,0	–	–	15,0	–	25,0	0,00	0,0084	0,273
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	140	–	–	58,0	–	82,0	0,00	0,0084	0,895
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	120	–	–	82,0	–	38,0	0,00	0,0084	0,415
21	4,65–10 *эв*	0,77	190	–	–	171	–	19,0	0,00	0,0084	0,207
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	9,54	–	–	0,54	–	9,00	0,00	0,0084	0,0982
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	9,47	–	–	0,47	–	9,00	0,00	0,0084	0,0982
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	9,58	–	–	0,58	–	9,00	0,00	0,0084	0,0982
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	9,90	–	–	0,90	–	9,00	0,00	0,0084	0,0982
T	0,0252 *эв*	–	11,7	–	–	2,71	–	9,00	–	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при *k*, равном									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,01	0,11	0,41	0,65	0,75	0,43	0,16	0,05	0,02
2	0,02	0,10	0,40	0,70	0,73	0,38	0,13	0,04	0,01	–
3	0,06	0,29	0,66	0,84	0,47	0,20	0,06	0,02	–	–
4	0,14	0,58	0,82	0,45	0,19	0,06	0,01	–	–	–
5	1,15	0,49	0,34	0,13	0,03	0,01	–	–	–	–
6	1,31	0,31	0,00	0,02	0,01	–	–	–	–	–
7	0,74	0,29	0,02	–	–	–	–	–	–	–
8	0,32	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–
9	0,07	0,09	0,03	–	–	–	–	–	–	–

i	*T*,°K	f_c при σ_0, равной						f_t при σ_0, равной				f_e при σ_e, равной			
		∞	10^4	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**
	300	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,93	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	0,99	0,98
10	900	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99	0,98
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	1,00	1,00	0,98	0,89	0,80	1,00	0,96	0,96	0,92	1,00	1,00	0,97	0,93
11	900	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,90	1,00	0,98	0,98	0,93	1,00	1,00	0,97	0,95
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	1,00	0,99	0,99	0,94	1,00	1,00	0,99	0,98
	300	1,00	1,00	0,99	0,92	0,75	0,63	0,99	0,87	0,87	0,73	0,99	0,98	0,91	0,85
12	900	1,00	1,00	0,99	0,95	0,86	0,77	1,00	0,89	0,89	0,73	1,00	0,98	0,93	0,87
	2100	1,00	1,00	1,00	0,98	0,93	0,87	1,00	0,93	0,93	0,73	1,00	1,00	0,95	0,88
	300	1,00	1,00	0,96	0,82	0,56	0,46	0,95	0,75	0,75	0,60	0,98	0,94	0,84	0,70
13	900	1,00	1,00	0,98	0,89	0,66	0,55	0,96	0,78	0,78	0,61	0,99	0,95	0,87	0,73
	2100	1,00	1,00	1,00	0,95	0,79	0,67	0,97	0,82	0,82	0,62	1,00	0,99	0,92	0,76
	300	1,00	0,99	0,89	0,63	0,34	0,29	0,91	0,64	0,64	0,50	0,95	0,84	0,74	0,60
14	900	1,00	1,00	0,93	0,74	0,43	0,36	0,92	0,65	0,65	0,51	0,97	0,86	0,77	0,63
	2100	1,00	1,00	0,97	0,82	0,51	0,42	0,93	0,68	0,68	0,53	0,99	0,91	0,82	0,66
	300	1,00	0,97	0,81	0,42	0,23	0,17	0,84	0,53	0,53	0,43	0,86	0,66	0,56	0,48
15	900	1,00	0,98	0,87	0,52	0,29	0,21	0,85	0,54	0,54	0,43	0,90	0,70	0,58	0,49
	2100	1,00	1,00	0,93	0,60	0,34	0,26	0,87	0,55	0,55	0,44	0,90	0,70	0,60	0,50

	300	1,00	0,94	0,65	0,27	0,136	0,106	0,87	0,50	0,50	0,46	0,84	0,73	0,68	0,63
16	900	1,00	0,95	0,74	0,35	0,18	0,132	0,92	0,51	0,51	0,46	0,88	0,75	0,70	0,64
	2100	1,00	0,97	0,83	0,45	0,23	0,17	0,95	0,52	0,52	0,46	0,92	0,78	0,72	0,65
	300	1,00	0,83	0,35	0,13	0,063	0,049	0,38	0,14	0,14	0,070	0,37	0,23	0,19	0,12
17	900	1,00	0,86	0,38	0,15	0,071	0,053	0,45	0,15	0,15	0,070	0,38	0,24	0,20	0,12
	2100	1,00	0,89	0,44	0,17	0,081	0,063	0,51	0,16	0,16	0,070	0,40	0,25	0,21	0,12
	300	1,00	0,81	0,30	0,108	0,052	0,042	0,39	0,25	0,25	0,22	0,54	0,45	0,42	0,38
18	900	1,00	0,87	0,33	0,12	0,055	0,044	0,44	0,25	0,25	0,22	0,54	0,45	0,42	0,38
	2100	1,00	0,94	0,37	0,13	0,061	0,049	0,48	0,26	0,26	0,22	0,54	0,45	0,42	0,38
	300	1,00	0,60	0,19	0,058	0,029	0,023	0,15	0,078	0,078	0,047	0,29	0,17	0,14	0,10
19	900	1,00	0,67	0,23	0,060	0,029	0,023	0,16	0,078	0,078	0,047	0,33	0,18	0,14	0,10
	2100	1,00	0,75	0,28	0,070	0,029	0,023	0,17	0,078	0,078	0,047	0,37	0,19	0,15	0,10
	300	1,00	0,66	0,23	0,065	0,030	0,023	0,17	0,087	0,087	0,075	0,43	0,31	0,28	0,24
20	900	1,00	0,73	0,28	0,073	0,030	0,023	0,20	0,087	0,087	0,075	0,47	0,31	0,28	0,24
	2100	1,00	0,82	0,36	0,080	0,030	0,023	0,23	0,087	0,087	0,075	0,51	0,32	0,28	0,24
	300	1,00	0,71	0,27	0,084	0,041	0,034	0,16	0,072	0,072	0,059	0,64	0,54	0,52	0,49
21	900	1,00	0,78	0,33	0,089	0,041	0,034	0,18	0,072	0,072	0,059	0,66	0,55	0,52	0,49
	2100	1,00	0,86	0,40	0,105	0,041	0,034	0,21	0,072	0,072	0,059	0,69	0,56	0,52	0,49

Плутоний (Pu^{239})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,70	2,20	3,86	0,01	0,64	3,85	0,84	0,0013	0,026
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,70	1,85	3,51	0,02	1,28	4,55	0,80	0,0017	0,026
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,90	1,97	3,27	0,03	1,25	4,65	0,71	0,0024	0,028
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,30	1,95	3,12	0,04	1,16	4,15	0,55	0,0037	0,027
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,30	1,80	3,01	0,06	1,14	4,30	0,45	0,0046	0,035
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,30	1,68	2,95	0,11	1,16	5,35	0,35	0,0054	0,0,42
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	9,90	1,66	2,91	0,17	0,95	7,12	0,23	0,0064	0,066
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,3	1,68	2,89	0,24	0,75	8,63	0,13	0,0072	0,090
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,5	1,85	2,88	0,40	0,55	9,70	0,07	0,0077	0,097
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	14,0	2,15	2,87	0,71	0,25	10,89	0,04	0,0080	0,113
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	15,0	2,40	2,87	1,08	0,10	11,42	0,02	0,0081	0,120
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	16,5	2,50	2,87	1,25	–	12,75	0,01	0,0082	0,137
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	18,0	3,40	2,87	1,90	–	12,7	0,00	0,0083	0,136
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	19,5	4,20	2,87	2,60	–	12,7	0,00	0,0083	0,137
15	465–1000 *эв*	0,77	26,0	7,60	2,87	5,00	–	13,4	0,00	0,0083	0,144
16	215–465 *эв*	0,77	36,5	13,0	2,87	9,1	–	14,4	0,00	0,0083	0,155
17	100–215 *эв*	0,77	48,0	19,0	2,87	14,0	–	15,0	0,00	0,0083	0,162
18	46,5–100 *эв*	0,77	127	61,0	2,87	46,0	–	20,0	0,00	0,0083	0,216
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	68,0	22,0	2,87	31,0	–	15,0	0,00	0,0083	0,162
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	194	110	2,87	72,0	–	12,0	0,00	0,0083	0,129
21	4,65–10 *эв*	0,77	90,5	45,0	2,87	35,0	–	10,5	0,00	0,0083	0,113

22	2,15–4,65 *эв*	0,77	23,0	12,0	2,87	1,0	–	10,0	0,00	0,0083	0,108
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	38,0	24,0	2,87	3,0	–	11,0	0,00	0,0083	0,119
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	189	103	2,87	73,0	–	13,3	0,00	0,0083	0,143
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	2896	1670	2,87	1210	–	15,7	0,00	0,0083	0,169
T	0,0252 *эв*	–	1038	742	2,87	286	–	9,5	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,00	0,04	0,15	0,26	0,32	0,18	0,07	0,03	0,01
2	0,01	0,05	0,20	0,36	0,36	0,18	0,08	0,03	0,01	–
3	0,04	0,15	0,31	0,40	0,22	0,09	0,03	0,01	–	–
4	0,10	0,20	0,42	0,27	0,12	0,04	0,01	–	–	–
5	0,30	0,43	0,23	0,13	0,04	0,01	–	–	–	–
6	0,59	0,44	0,09	0,03	0,01	–	–	–	–	–
7	0,76	0,16	0,02	0,01	–	–	–	–	–	–
8	0,60	0,15	–	–	–	–	–	–	–	–
9	0,43	0,12	–	–	–	–	–	–	–	–
10	0,11	0,14	–	–	–	–	–	–	–	–
11	0,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–

i	***T*,°K**	f_f **при σ_0, равной**				f_c **при σ_0, равной**				f_t **при σ_0, равной**			f_e ***при*** σ_e**, равной**		
		10^3	10^2	**10**	**0**	10^3	10^2	**10**	**0**	10^2	**10**	**0**	10^2	**10**	**0**
	300	1,00	1,00	0,96	0,93	1,00	1,00	0,95	0,92	1,00	0,95	0,94	1,00	1,00	0,99
11	900	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,98	0,89	0,84	1,00	0,98	0,88	0,82	0,97	0,90	0,87	1,00	0,97	0,96
12	900	1,00	0,99	0,91	0,88	1,00	0,99	0,92	0,86	0,98	0,95	0,90	1,00	0,98	0,97
	2100	1,00	1,00	0,96	0,91	1,00	1,00	0,96	0,90	0,99	0,98	0,94	1,00	0,99	0,98
	300	1,00	0,93	0,73	0,64	1,00	0,93	0,72	0,62	0,92	0,83	0,76	0,98	0,94	0,92
13	900	1,00	0,95	0,78	0,69	1,00	0,95	0,79	0,68	0,94	0,90	0,80	0,99	0,95	0,93
	2100	1,00	0,98	0,86	0,73	1,00	0,98	0,87	0,74	0,97	0,95	0,85	1,00	0,97	0,94
	300	0,98	0,87	0,62	0,49	0,98	0,85	0,60	0,46	0,84	0,71	0,64	0,96	0,92	0,89
14	900	0,99	0,91	0,68	0,55	0,99	0,89	0,66	0,52	0,87	0,76	0,69	0,97	0,93	0,90
	2100	1,00	0,93	0,71	0,61	1,00	0,92	0,72	0,58	0,91	0,82	0,75	0,98	0,94	0,91
	300	0,96	0,80	0,51	0,38	0,95	0,72	0,44	0,32	0,74	0,58	0,51	0,93	0,86	0,83
15	900	0,97	0,86	0,58	0,44	0,97	0,79	0,51	0,38	0,80	0,63	0,56	0,95	0,87	0,84
	2100	0,99	0,92	0,65	0,50	0,99	0,86	0,58	0,44	0,87	0,69	0,62	0,96	0,89	0,86
	300	0,91	0,68	0,38	0,29	0,90	0,57	0,30	0,21	0,64	0,46	0,40	0,87	0,79	0,76
16	900	0,94	0,76	0,46	0,34	0,93	0,65	0,38	0,26	0,70	0,52	0,44	0,89	0,82	0,78
	2100	0,96	0,84	0,55	0,39	0,96	0,73	0,47	0,31	0,76	0,59	0,49	0,92	0,84	0,80

	300	0,84	0,54	0,27	0,20	0,79	0,42	0,20	0,14	0,52	0,35	0,31	0,81	0,73	0,71
17	900	0,88	0,59	0,30	0,22	0,83	0,47	0,23	0,16	0,57	0,38	0,32	0,82	0,74	0,72
	2100	0,91	0,63	0,32	0,23	0,86	0,51	0,25	0,18	0,61	0,40	0,33	0,84	0,75	0,73
	300	0,66	0,32	0,18	0,16	0,55	0,22	0,11	0,10	0,30	0,20	0,16	0,61	0,55	0,55
18	900	0,74	0,35	0,19	0,17	0,63	0,25	0,12	0,11	0,32	0,21	0,17	0,63	0,56	0,55
	2100	0,81	0,38	0,20	0,18	0,71	0,29	0,13	0,12	0,34	0,22	0,18	0,65	0,57	0,56
	300	0,70	0,33	0,19	0,16	0,65	0,28	0,15	0,13	0,33	0,21	0,19	0,76	0,72	0,71
19	900	0,77	0,37	0,21	0,18	0,72	0,32	0,17	0,15	0,36	0,23	0,21	0,77	0,72	0,72
	2100	0,85	0,41	0,22	0,20	0,81	0,36	0,19	0,17	0,39	0,25	0,23	0,79	0,73	0,72
	300	0,68	0,33	0,19	0,17	0,65	0,29	0,18	0,16	0,18	0,11	0,10	0,88	0,86	0,86
20	900	0,73	0,36	0,20	0,18	0,70	0,33	0,19	0,17	0,23	0,13	0,11	0,89	0,87	0,86
	2100	0,80	0,39	0,21	0,19	0,77	0,36	0,20	0,18	0,27	0,15	0,12	0,89	0,87	0,86
	300	0,67	0,33	0,20	0,18	0,65	0,31	0,19	0,17	0,20	0,18	0,17	0,96	0,96	0,96
21	900	0,71	0,35	0,21	0,19	0,69	0,33	0,20	0,18	0,23	0,19	0,18	0,97	0,96	0,96
	2100	0,76	0,37	0,22	0,20	0,74	0,35	0,21	0,19	0,25	0,20	0,19	0,97	0,96	0,96
	300	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
24	900	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
	2100	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
	300	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84
25	900	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84
	2100	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84

Плутоний (Pu^{240})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	2,00	3,80	0,01	0,84	3,45	0,84	0,0013	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,50	1,55	3,44	0,02	1,58	4,35	0,80	0,0017	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,70	1,62	3,24	0,04	1,59	4,45	0,71	0,0024	0,026
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,10	1,60	3,05	0,09	1,46	3,95	0,53	0,0039	0,027
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	6,90	1,50	2,94	0,24	0,97	4,19	0,42	0,0048	0,035
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,00	0,58	2,88	0,26	1,27	5,89	0,33	0,0056	0,048
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	10,0	0,12	2,84	0,34	0,95	8,59	0,21	0,0066	0,082
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	0,05	2,82	0,45	0,50	10,5	0,12	0,0073	0,111
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,5	0,03	2,82	0,65	0,17	11,7	0,07	0,0077	0,117
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	13,5	0,02	2,81	0,90	–	12,6	0,04	0,0080	0,130
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	14,5	0,02	2,81	1,30	–	13,2	0,02	0,0081	0,139
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	15,5	0,02	2,81	1,80	–	13,7	0,01	0,0082	0,146
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	16,5	–	–	2,70	–	13,8	0,00	0,0083	0,149
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	18,0	–	–	4,50	–	13,5	0,00	0,0083	0,146
15	465–1000 *эв*	0,77	25,0	–	–	6,50	–	18,5	0,00	0,0083	0,199

16	215–465 *эв*	0,77	30,0	–	–	12,0	–	18,0	0,00	0,0083	0,194
17	100–215 *эв*	0,77	36,0	–	–	18,0	–	18,0	0,00	0,0083	0,194
18	46,5–100 *эв*	0,77	108	–	–	49,0	–	59,0	0,00	0,0083	0,639
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	71,0	–	–	44,0	–	27,0	0,00	0,0083	0,291
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	60,0	–	–	28,0	–	32,0	0,00	0,0083	0,345
21	4,65–10 *эв*	0,77	33,6	–	–	0,60	–	33,0	0,00	0,0083	0,356
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	52,0	–	–	6,00	–	46,0	0,00	0,0083	0,496
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	15250	–	–	14250	–	1000	0,00	0,0083	10,78
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	1190	–	–	1110	–	80	0,00	0,0083	0,863
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	170	–	–	160	–	10	0,00	0,0083	0,108
T	0,0252 *эв*	–	305	–	–	295	–	10	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ при *k*, равном								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	0,00	0,00	0,05	0,20	0,30	0,32	0,17	0,06	0,02 0,01
2	0,01	0,06	0,26	0,44	0,46	0,24	0,08	0,02	–
3	0,04	0,18	0,40	0,52	0,28	0,12	0,04	0,01	–
4	0,09	0,38	0,53	0,29	0,12	0,04	0,01	–	–
5	0,51	0,24	0,15	0,06	0,01	–	–	–	–
6	1,00	0,25	0,02	–	–	–	–	–	–
7	0,67	0,26	0,02	–	–	–	–	–	–
8	0,30	0,20	–	–	–	–	–	–	–
9	0,06	0,08	0,03	–	–	–	–	–	–

i	*T*,°K	f_f при σ_0, равной				f_c при σ_0, равной				f_t при σ_0, равной			f_e при σ_e, равной		
		10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^2	10	0	10^2	10	0
	300	1,00	1,00	0,96	0,93	1,00	1,00	0,95	0,92	1,00	0,95	0,94	1,00	1,00	0,99
11	900	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,98	0,89	0,84	1,00	0,98	0,88	0,82	0,97	0,90	0,87	1,00	0,97	0,96
12	900	1,00	0,99	0,91	0,88	1,00	0,99	0,92	0,86	0,98	0,95	0,90	1,00	0,98	0,97
	2100	1,00	1,00	0,96	0,91	1,00	1,00	0,96	0,90	0,99	0,98	0,94	1,00	0,99	0,98
	300	1,00	0,93	0,73	0,64	1,00	0,93	0,72	0,62	0,92	0,83	0,76	0,98	0,94	0,92
13	900	1,00	0,95	0,78	0,69	1,00	0,95	0,79	0,68	0,94	0,90	0,80	0,99	0,95	0,93
	2100	1,00	0,98	0,86	0,73	1,00	0,98	0,87	0,74	0,97	0,95	0,85	1,00	0,97	0,94
	300	0,98	0,87	0,62	0,49	0,98	0,85	0,60	0,46	0,84	0,71	0,64	0,96	0,92	0,89
14	900	0,99	0,91	0,68	0,55	0,99	0,89	0,66	0,52	0,87	0,76	0,69	0,97	0,93	0,90
	2100	1,00	0,93	0,71	0,61	1,00	0,92	0,72	0,58	0,91	0,82	0,75	0,98	0,94	0,91
	300	0,96	0,80	0,51	0,38	0,95	0,72	0,44	0,32	0,74	0,58	0,51	0,93	0,86	0,83
15	900	0,97	0,86	0,58	0,44	0,97	0,79	0,51	0,38	0,80	0,63	0,56	0,95	0,87	0,84
	2100	0,99	0,92	0,65	0,50	0,99	0,86	0,58	0,44	0,87	0,69	0,62	0,96	0,89	0,86

	300	0,91	0,68	0,38	0,29	0,90	0,57	0,30	0,21	0,64	0,46	0,40	0,87	0,79	0,76
16	900	0,94	0,76	0,46	0,34	0,93	0,65	0,38	0,26	0,70	0,52	0,44	0,89	0,82	0,78
	2100	0,96	0,84	0,55	0,39	0,96	0,73	0,47	0,31	0,76	0,59	0,49	0,92	0,84	0,80
	300	0,84	0,54	0,27	0,20	0,79	0,42	0,20	0,14	0,52	0,35	0,31	0,81	0,73	0,71
17	900	0,88	0,59	0,30	0,22	0,83	0,47	0,23	0,16	0,57	0,38	0,32	0,82	0,74	0,72
	2100	0,91	0,63	0,32	0,23	0,86	0,51	0,25	0,18	0,61	0,40	0,33	0,84	0,75	0,73
	300	0,66	0,32	0,18	0,16	0,55	0,22	0,11	0,10	0,30	0,20	0,16	0,61	0,55	0,55
18	900	0,74	0,35	0,19	0,17	0,63	0,25	0,12	0,11	0,32	0,21	0,17	0,63	0,56	0,55
	2100	0,81	0,38	0,20	0,18	0,71	0,29	0,13	0,12	0,34	0,22	0,18	0,65	0,57	0,56
	300	0,70	0,33	0,19	0,16	0,65	0,28	0,15	0,13	0,33	0,21	0,19	0,76	0,72	0,71
19	900	0,77	0,37	0,21	0,18	0,72	0,32	0,17	0,15	0,36	0,23	0,21	0,77	0,72	0,72
	2100	0,85	0,41	0,22	0,20	0,81	0,36	0,19	0,17	0,39	0,25	0,23	0,79	0,73	0,72
	300	0,68	0,33	0,19	0,17	0,65	0,29	0,18	0,16	0,18	0,11	0,10	0,88	0,86	0,86
20	900	0,73	0,36	0,20	0,18	0,70	0,33	0,19	0,17	0,23	0,13	0,11	0,89	0,87	0,86
	2100	0,80	0,39	0,21	0,19	0,77	0,36	0,20	0,18	0,27	0,15	0,12	0,89	0,87	0,86
	300	0,67	0,33	0,20	0,18	0,65	0,31	0,19	0,17	0,20	0,18	0,17	0,96	0,96	0,96
21	900	0,71	0,35	0,21	0,19	0,69	0,33	0,20	0,18	0,23	0,19	0,18	0,97	0,96	0,96
	2100	0,76	0,37	0,22	0,20	0,74	0,35	0,21	0,19	0,25	0,20	0,19	0,97	0,96	0,96
	300	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
24	900	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
	2100	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
	300	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84
25	900	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84
	2100	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84

Плутоний (Pu^{241})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,70	1,70	4,00	0,00	1,15	3,85	0,84	0,0013	0,026
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,70	1,35	3,62	0,01	1,79	4,55	0,80	0,0016	0,025
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,90	1,40	3,41	0,02	1,83	4,65	0,71	0,0024	0,027
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,30	1,45	3,21	0,03	1,67	4,15	0,55	0,0037	0,027
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,30	1,30	3,11	0,06	1,64	4,30	0,45	0,0045	0,034
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,30	1,30	3,04	0,09	1,20	5,71	0,35	0,0053	0,044
7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	10,0	1,60	3,00	0,16	0,60	7,64	0,23	0,0063	0,070
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	2,10	2,98	0,26	0,30	8,84	0,13	0,0071	0,091
9	46,5–100 *кэв*	0,77	12,7	2,80	2,97	0,39	–	9,51	0,07	0,0076	0,094
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	14,4	3,80	2,96	0,61	–	10,0	0,04	0,0079	0,102
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	16,9	5,40	2,96	0,97	–	10,5	0,02	0,0080	0,110

12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	18,8	6,50	2,96	1,30	–	11,0	0,01	0,0081	0,116
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	23,0	9,00	2,96	2,00	–	12,0	0,00	0,0082	0,128
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	27,9	12,0	2,96	2,90	–	13,0	0,00	0,0082	0,138
15	465–1000 *эв*	0,77	33,0	16,0	2,96	4,00	–	13,0	0,00	0,0082	0,138
16	215–465 *эв*	0,77	38,5	21,0	2,96	5,50	–	12,0	0,00	0,0082	0,128
17	100–215 *эв*	0,77	50,0	30,0	2,96	8,00	–	12,0	0,00	0,0082	0,128
18	46,5–100 *эв*	0,77	62,0	40,0	2,96	11,0	–	11,0	0,00	0,0082	0,117
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	87,0	60,0	2,96	16,0	–	11,0	0,00	0,0082	0,117
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	176	130	2,96	35,0	–	11,0	0,00	0,0082	0,117
21	4,65–10 *эв*	0,77	271	220	2,96	40,0	–	11,0	0,00	0,0082	0,117
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	131	80	2,96	40,0	–	11,0	0,00	0,0082	0,117
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	60,0	35	2,96	15,0	–	10,0	0,00	0,0082	0,107
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	75,0	45	2,96	20,0	–	10,0	0,00	0,0082	0,107
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	1160	850	2,96	300	–	10,5	0,00	0,0082	0,112
T	0,0252 *эв*	–	1430	1020	2,96	400	–	10,0	0,00	–	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
1	0,00	0,01	0,05	0,25	0,42	0,54	0,34	0,14	0,04	0,01	–
2	–	0,02	0,07	0,33	0,50	0,48	0,24	0,10	0,04	0,01	–
3	–	–	0,10	0,25	0,50	0,52	0,29	0,12	0,04	0,01	–
4	–	–	–	0,19	0,34	0,54	0,37	0,15	0,06	0,02	–
5	–	–	–	–	0,37	0,60	0,40	0,18	0,07	0,02	–
6	–	–	–	–	–	0,43	0,43	0,20	0,10	0,03	0,01
7	–	–	–	–	–	–	0,24	0,26	0,07	0,03	–
8	–	–	–	–	–	–	–	0,19	0,08	0,03	–

i	***T*,^{o}K**	f_f **при σ_0, равной**				f_c **при σ_0, равной**				f_t **при σ_0, равной**			f_e **при σ_e, равной**		
		10^3	10^2	10	0	10^3	10^2	10	0	10^2	10	0	10^2	10	0
	300	1,00	1,00	0,96	0,93	1,00	1,00	0,95	0,92	1,00	0,95	0,94	1,00	1,00	0,99
11	900	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	0,98	0,97	1,00	1,00	1,00
	2100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	300	1,00	0,98	0,89	0,84	1,00	0,98	0,88	0,82	0,97	0,90	0,87	1,00	0,97	0,96
12	900	1,00	0,99	0,91	0,88	1,00	0,99	0,92	0,86	0,98	0,95	0,90	1,00	0,98	0,97
	2100	1,00	1,00	0,96	0,91	1,00	1,00	0,96	0,90	0,99	0,98	0,94	1,00	0,99	0,98
	300	1,00	0,93	0,73	0,64	1,00	0,93	0,72	0,62	0,92	0,83	0,76	0,98	0,94	0,92
13	900	1,00	0,95	0,78	0,69	1,00	0,95	0,79	0,68	0,94	0,90	0,80	0,99	0,95	0,93
	2100	1,00	0,98	0,86	0,73	1,00	0,98	0,87	0,74	0,97	0,95	0,85	1,00	0,97	0,94
	300	0,98	0,87	0,62	0,49	0,98	0,85	0,60	0,46	0,84	0,71	0,64	0,96	0,92	0,89
14	900	0,99	0,91	0,68	0,55	0,99	0,89	0,66	0,52	0,87	0,76	0,69	0,97	0,93	0,90
	2100	1,00	0,93	0,71	0,61	1,00	0,92	0,72	0,58	0,91	0,82	0,75	0,98	0,94	0,91

	300	0,96	0,80	0,51	0,38	0,95	0,72	0,44	0,32	0,74	0,58	0,51	0,93	0,86	0,83
15	900	0,97	0,86	0,58	0,44	0,97	0,79	0,51	0,38	0,80	0,63	0,56	0,95	0,87	0,84
	2100	0,99	0,92	0,65	0,50	0,99	0,86	0,58	0,44	0,87	0,69	0,62	0,96	0,89	0,86
	300	0,91	0,68	0,38	0,29	0,90	0,57	0,30	0,21	0,64	0,46	0,40	0,87	0,79	0,76
16	900	0,94	0,76	0,46	0,34	0,93	0,65	0,38	0,26	0,70	0,52	0,44	0,89	0,82	0,78
	2100	0,96	0,84	0,55	0,39	0,96	0,73	0,47	0,31	0,76	0,59	0,49	0,92	0,84	0,80
	300	0,84	0,54	0,27	0,20	0,79	0,42	0,20	0,14	0,52	0,35	0,31	0,81	0,73	0,71
17	900	0,88	0,59	0,30	0,22	0,83	0,47	0,23	0,16	0,57	0,38	0,32	0,82	0,74	0,72
	2100	0,91	0,63	0,32	0,23	0,86	0,51	0,25	0,18	0,61	0,40	0,33	0,84	0,75	0,73
	300	0,66	0,32	0,18	0,16	0,55	0,22	0,11	0,10	0,30	0,20	0,16	0,61	0,55	0,55
18	900	0,74	0,35	0,19	0,17	0,63	0,25	0,12	0,11	0,32	0,21	0,17	0,63	0,56	0,55
	2100	0,81	0,38	0,20	0,18	0,71	0,29	0,13	0,12	0,34	0,22	0,18	0,65	0,57	0,56
	300	0,70	0,33	0,19	0,16	0,65	0,28	0,15	0,13	0,33	0,21	0,19	0,76	0,72	0,71
19	900	0,77	0,37	0,21	0,18	0,72	0,32	0,17	0,15	0,36	0,23	0,21	0,77	0,72	0,72
	2100	0,85	0,41	0,22	0,20	0,81	0,36	0,19	0,17	0,39	0,25	0,23	0,79	0,73	0,72
	300	0,68	0,33	0,19	0,17	0,65	0,29	0,18	0,16	0,18	0,11	0,10	0,88	0,86	0,86
20	900	0,73	0,36	0,20	0,18	0,70	0,33	0,19	0,17	0,23	0,13	0,11	0,89	0,87	0,86
	2100	0,80	0,39	0,21	0,19	0,77	0,36	0,20	0,18	0,27	0,15	0,12	0,89	0,87	0,86
	300	0,67	0,33	0,20	0,18	0,65	0,31	0,19	0,17	0,20	0,18	0,17	0,96	0,96	0,96
21	900	0,71	0,35	0,21	0,19	0,69	0,33	0,20	0,18	0,23	0,19	0,18	0,97	0,96	0,96
	2100	0,76	0,37	0,22	0,20	0,74	0,35	0,21	0,19	0,25	0,20	0,19	0,97	0,96	0,96
	300	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
24	900	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
	2100	0,94	0,79	0,70	0,69	0,77	0,62	0,53	0,52	0,54	0,47	0,45	0,94	0,89	0,88
	300	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84
25	900	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84
	2100	0,68	0,61	0,59	0,59	0,68	0,57	0,56	0,56	0,33	0,30	0,30	0,85	0,84	0,84

Плутоний (Pu^{242})

i	E_n	ΔU	σ_t	σ_f	ν	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ	ξ	$\sigma_{з(e)}$
1	6,5–10,5 *Мэв*	0,48	6,30	1,60	3,89	0,00	1,25	3,45	0,84	0,0013	0,023
2	4,0–6,5 *Мэв*	0,48	7,60	1,23	3,52	0,01	1,91	4,45	0,80	0,0016	0,024
3	2,5–4,0 *Мэв*	0,48	7,80	1,23	3,30	0,03	1,99	4,55	0,71	0,0024	0,027
4	1,4–2,5 *Мэв*	0,57	7,30	1,27	3,10	0,06	1,82	4,15	0,53	0,0038	0,028
5	0,8–1,4 *Мэв*	0,57	7,00	1,27	3,00	0,12	1,23	4,38	0,42	0,0048	0,037
6	0,4–0,8 *Мэв*	0,69	8,00	0,32	2,93	0,15	1,46	6,07	0,33	0,0055	0,048

7	0,2–0,4 *Мэв*	0,69	10,0	0,06	2,89	0,17	1,00	8,77	0,21	0,0065	0,083
8	0,1–0,2 *Мэв*	0,69	11,5	0,03	2,87	0,25	0,53	10,7	0,12	0,0072	0,112
9	46,5–100 *кэв*	0,77	13,0	0,02	2,86	0,40	0,17	12,4	0,07	0,0076	0,122
10	21,5–46,5 *кэв*	0,77	13,5	0,02	2,85	0,50	0,00	13,0	0,04	0,0079	0,133
11	10,0–21,5 *кэв*	0,77	14,5	0,01	2,85	0,70	–	13,8	0,02	0,0080	0,143
12	4,65–10,0 *кэв*	0,77	15,5	0,01	2,85	1,00	–	14,5	0,01	0,0081	0,153
13	2,15–4,65 *кэв*	0,77	16,5	–	–	1,60	–	14,9	0,00	0,0082	0,159
14	1,0–2,15 *кэв*	0,77	18,0	–	–	2,80	–	15,2	0,00	0,0082	0,162
15	465–1000 *эв*	0,77	22,0	–	–	4,50	–	17,5	0,00	0,0082	0,186
16	215–465 *эв*	0,77	30	–	–	9,00	–	21,0	0,00	0,0082	0,224
17	100–215 *эв*	0,77	40	–	–	17,0	–	23,0	0,00	0,0082	0,225
18	46,5–100 *эв*	0,77	100	–	–	35,0	–	65,0	0,00	0,0082	0,692
19	21,5–46,5 *эв*	0,77	11,0	–	–	1,0	–	10,0	0,00	0,0082	0,106
20	10,0–21,5 *эв*	0,77	11,0	–	–	1,0	–	10,0	0,00	0,0082	0,106
21	4,65–10 *эв*	0,77	11,0	–	–	1,0	–	10,0	0,00	0,0082	0,106
22	2,15–4,65 *эв*	0,77	1400	–	–	1300	–	100	0,00	0,0082	1,06
23	1,0–2,15 *эв*	0,77	26,0	–	–	15,0	–	11,0	0,00	0,0082	0,117
24	0,465–1,0 *эв*	0,77	17,0	–	–	7,0	–	10,0	0,00	0,0082	0,106
25	0,215–0,465 *эв*	0,77	18,0	–	–	8,00	–	10,0	0,00	0,0082	0,106
T	0,0252 *эв*	–	35,0	–	–	25,0	–	10,0	0,00	0,0082	–

i	$\sigma_{in(i,\,i+k)}$ **при *k*, равном**									
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	0,00	0,01	0,07	0,29	0,45	0,48	0,25	0,10	0,03	0,01
2	0,01	0,08	0,31	0,54	0,56	0,28	0,09	0,03	0,01	–
3	0,04	0,22	0,51	0,66	0,36	0,15	0,04	0,01	–	–
4	0,10	0,47	0,67	0,37	0,15	0,05	0,01	–	–	–
5	0,65	0,29	0,20	0,07	0,02	–	–	–	–	–
6	1,16	0,28	0,02	–	–	–	–	–	–	–
7	0,70	0,28	0,02	–	–	–	–	–	–	–
8	0,31	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–
9	0,06	0,08	0,03	–	–	–	–	–	–	–

i	***T*,°K**	f_c **при** σ_0**, равной**			f_t **при** σ_0**, равной**			f_e **при** σ_e**, равной**		
		10^5	10^4	10^3	10^5	10^4	10^3	10^5	10^4	10^3
	300	0,94	0,65	0,22	0,86	0,51	0,19	0,95	0,70	0,34
18	900	0,96	0,72	0,26	0,87	0,66	0,20	0,97	0,76	0,38
	2100	0,97	0,77	0,31	0,89	0,73	0,22	0,98	0,81	0,42
	300	0,85	0,46	0,17	0,71	0,26	0,095	0,87	0,51	0,25
22	900	0,89	0,52	0,18	0,77	0,30	0,096	0,90	0,57	0,26
	2100	0,93	0,59	0,20	0,82	0,42	0,097	0,93	0,63	0,28

Для остальных групп $f_c\, f_t, f_e \sim 1$ при $\sigma_0 > 1000$ барн.

Таблица 1

Вклад в полную мощность эквивалентной дозы $\dot{H}$ нейтронов различных энергетических групп n_i (%) и дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов $k_д$ (d, $E_{пор}$) для разных сред

Материал	Плотность, г/см3	E_0, МэВ	Толщина защиты, см	n_i для различных энергетических групп нейтронов при различных $E_{гр}$										
						$E_{гр}$=0,5 МэВ		$E_{гр}$=1,0 МэВ		$E_{гр}$=1,5 МэВ		$E_{гр}$=2,0 МэВ		
				Тепловые (E≤1 эВ)	Медленные (1 эВ<E≤10^2 эВ)	Промежуточные (10^2эВ<E≤$E_{гр}$)	Быстрые (E>$E_{гр}$)	Промежуточные (10^2эВ<E≤$E_{гр}$)	Быстрые (E>$E_{гр}$)	Промежуточные (10^2эВ<E≤$E_{гр}$)	Быстрые (E>$E_{гр}$)	Промежуточные (10^2эВ<E≤$E_{гр}$)	Быстрые (E>$E_{гр}$)	$k_д$ (d, $E_{пор}$ = 2 МэВ)
Вода	1,0	Нейтроны спектра деления	30–120	6,5	0,5	7,5	85,5	16	77	33	60	38	55	1,8
		2	30–120	15	1	17	67	38	46	56	28			
		4	30–120	8	1	10	81	22	69	35	56	45	46	2,2
		6	30–120	6,4	0,6	8	85	18	75	28	65	35	58	1,7
		8	30–120	6	0,5	7	86,5	14,5	79	22	71,5	29	64,5	1,6
		10	30–120	5	0,4	6	89	13	82	20	75	25	70	1,4
		14	30–120	2,7	0,3	4	93	10	87	15	82	18	79	1,3
		Po – α – Be Ra – α – Be Ru – α – Be	30–120	7,4	0,6	7,4	84,6	16	76	24	68	31	61	1,6
Углерод	1,67	Нейтроны спектра деления	60 г/см^2	89	1	3	7	5	5	7	3	8,5	1,5	67
Бериллий	–	То же	60 г/см^2	Не оценен	0,4	3	96	13	86	34	65	57	42	2,4
Бетон	2,3	»	50	20	4	29	47	50	26	62	14	–	–	–
Железо	7,8	»	>90	–	7	93	–	93	–	93	–	93	–	–

Таблица 2

Длина релаксации плотности потока нейтронов в различных средах для нейтронов реактора, г/см²

Среда	d, г/см²	Детектор «1/ν»	> 0,33	> 2	> 3	> 5	> 7
Вода	10–30	–	8,1*¹;	8,1*¹; ; 7,6	8,1*¹; 8,1	9,2*¹; 9,6	11,1*¹; 10,1
	30–60	7,4	8,9*¹;	9,3*¹; ; 9,1	9,5*¹; 9,3	10,5*¹; 10,4	11,2*¹; 11,2
	60–100	8,7	9,3*¹;	10,7*¹; ; 10,6	10,7*¹; 10,6	11,0*¹; 11,3	12,1*¹; 12,6
	0–100	–	10*¹;	- -	- -	- -	- -
Углерод	0–50	–	–	18,9	20,9	23,0	20,0
	50–100	–	–	20,0	24 ; 21,7	24,0	21,7
	100–150	–	21,1*²	21,7 ; 23,0	26,6; 22,4	25,4	27,1 ; 23,4
	150–220	–	26,8*²	24,3 ; 26,4	26,3 ; 26,4	227,8	25,6
	0–220	–	24	22,0	22,9	25,0	22,7
Карбид бора	0–90	11,8	–	–	16,7; 20,6*¹	–	–
	11–65	–	–	–	- -	–	22,9*¹
Полиэтилен	0–28	–	–	5,78	6,9*¹; 6,20	7,15*¹; 6,70	8,4*¹; 7,35
	28–55	–	–	6,67	7,6*¹; 6,95	8,2*¹; 7,45	8,9*¹; 7,86
	55–83	–	–	7,63	8,1*¹; 7,81	8,75*¹; 8,08	9,9*¹; 8,36
	0–83	–	–	6,70	7,00	7,45	7,86
Железо	0–510	–	–	59 ; 55,4			
Свинец	0–840	–	–	117	107	109	109
	11–565	–	–	–	106*¹	–	98,2*¹; 98,4*¹

*¹ Расчетные значения.

*² Доза для нейтронов с E > 0,5 МэВ, экспериментальные значения

Таблица 3

Дозовые характеристики моноэнергетических нейтронов

Энергия нейтронов E_n, МэВ	Удельная d, 10^{-15} Зв· м^2 / нейтр.	Флюенс Ф, 10^{13} нейтр./ м^2, создающий $H_{ПДДА} = 5 \cdot 10^{-2}$ Зв	$\varphi_{ДППА}$ 10^4 нейтр./(м^2 · с)	Коэффициент качества к	Коэффициент изотропности J
Тепловые	0,91	5,0	770	2,8	6
$1 \cdot 10^{-7}$	0,91	5,0	770	2,8	6
$1 \cdot 10^{-6}$	2,1	2,4	330	2,8	5
$1 \cdot 10^{-4}$	1,1	2,4	330	2,8	5
$5 \cdot 10^{-3}$	1,6	3,1	430	2,5	6
$1^2 \cdot 10^{-2}$	1,7	2,9	400	2,7	5
$1 \cdot 10^{-1}$	8,2	0,61	84	9,0	3
$5 \cdot 10^{-1}$	0,26	0,19	27	12	2,2
1	0,37	0,13	19	12	2,2
2,5	0,43	0,12	16	10	1,5
5	0,43	0,12	16	8,4	1,6
10	0,50	0,10	14	6,7	1,7
20	0,63	0,079	11	8,0	2,5

Таблица 4

Коэффициенты теплопроводности бетонов и некоторых теплоизоляционных материалов Вт/ (м · град)

Бетон или материал	Температура нагрева °С					
	100	300	600	700	900	1100
Обычный бетон	1,1	1,2	–	–	–	–
Жаростойкий, заполнитель – хромит	1,33	1,4	1,51	1,57	1,63	1,75
Жаростойкий, заполнитель – базальт, андезит	1,22	1,35	1,48	1,60	–	–
Жаростойкий, заполнитель – глиняный кирпич	0,67	1,79	0,90	1,0	–	–
Жаростойкий, заполнитель – магнезит	5,90	5,35	4,78	4,20	3,60	3,0
Жаростойкий, заполнитель – шалют	0,48	0,67	0,83	–	–	–
Серпентинитовый	0,90	0,88	0,85	–	–	–
Минеральная вата	0,07	0,099	0,13	–	–	–
Стеклянная вата	0,065	0,144	–	–	–	–

Таблица 5

Удельный гамма эквивалент (γ-эквивалент на 1 кг Ra) для смеси продуктов деления U^{235} в зависимости от времени кампании T и времени выдержки t при удельной мощности реактора W = 1 Вт/гр. (короткоживущие, $T_{1/2} \leq 2$ сут, не учитываются)

Время выдержки t, (сутки)	Время компании, T, сутки												
	10	20	30	45	60	90	120	130	150	200	360	720	∞
0	95,96	131,9	151,6	169,4	179,6	192,7	202,0	203,9	207,9	214,7	223,9	227,0	247,1
10	36,03	55,53	68,25	80,16	85,9	96,01	108,0	110,0	113,3	119,7	128,1	131,0	151,2
15	25,62	41,05	51,59	62,25	69,69	80,23	86,31	89,51	92,71	98,79	106,5	109,6	129,7
20	19,51	32,07	40,97	50,30	57,95	66,69	73,61	75,73	78,78	85,57	92,26	94,97	115,1
30	12,6	21,39	28,05	35,48	41,18	49,70	55,97	57,88	60,68	65,93	72,93	75,47	95,51
45	7,59	13,36	18,12	23,81	28,44	35,65	41,10	42,77	45,18	49,64	55,81	58,13	78,20
60	5,21	9,21	13,14	17,77	21,67	27,89	33,00	34,07	36,14	40,08	45,39	47,50	67,60
90	3,20	6,00	8,57	11,95	14,80	19,47	23,01	24,10	25,66	28,62	32,67	34,47	54,40
120	2,29	4,36	6,26	8,76	10,92	14,42	17,09	17,91	19,88	21,70	24,41	25,98	45,87
150	1,71	3,26	4,70	6,57	8,20	10,82	12,82	13,44	14,32	16,00	18,40	19,87	39,12
180	1,29	2,45	3,53	4,93	6,14	8,11	9,53	10,10	10,75	12,03	13,94	15,32	34,95
200	1,06	2,02	2,91	4,07	5,07	6,70	7,95	8,35	8,30	9,96	11,61	12,76	32,49
360	0,238	0,451	0,661	0,923	1,15	1,54	1,87	2,00	2,14	2,45	3,12	3,92	23,34
720	0,030	0,055	0,094	0,128	0,164	0,228	0,324	0,358	0,396	0,492	0,813	1,36	20,22
1080	0,018	0,032	0,058	0,076	0,095	0,132	0,204	0,228	0,254	0,316	0,559	1,00	19,43
1800	0,012	0,021	0,040	0,052	0,063	0,086	0,142	0,162	0,182	0,223	0,415	0,787	18,44

Таблица 6

Характеристики, определяющие активацию теплоносителя

Тепло-носитель	Ядерная реакция	Содержание изотопа в естественной смеси, %	Сечение реакции на тепловых нейтронах, барн	Период полураспада, $T_{1/2}$	Выход γ квантов на 1 акт распада	Вид и энергия излучения, МэВ	Эффективное сечение активации надтепловыми нейтронами, барн
H_2O а) D_2O	$O^{16}(n,p)N^{16}$ $O^{17}(n,p)N^{17}$	99,8 0,039	$1{,}6\cdot10^{-5}$ *) $7\cdot10^{-6}$ *)	7,35 с 4,14 с	0,82 – (**)	γ – 6,13 и 7,1 β – 4 и 10 β – 3,7	0,014 мбарн –
Б)	$O^{18}(n,\gamma)O^{19}$	0,16	$2{,}1\cdot10^{-4}$	27 с	0,7	β – 4,5 и γ – 1,36	0
Na	$Na^{23}(n,\gamma)Na^{24}$	100	0,54	14,9 с	1 1 0,04	γ – 1,37 β – 1,4 γ – 2,75 γ – 4,12	0,25
K	$K^{41}(n,\gamma)K^{42}$	6,91	1,1	12,5 с	0,182	γ – 1,51	0,89
Li	$Li^{7}(n,\gamma)Li^{8}$	92,6	0,033	0,88	–	β – 13,4 (дает жесткое торможение излучения)	31
Pb –Bi	Все определяется примесями. Собственная активность мала.						
N	$N^{15}(n,\gamma)N^{16}$	0,37	$2{,}4\cdot10^{-5}$	7,35 с	0,82	γ – 6,13; 7,11 β – 4; 10	–
He	Активация типичной примеси $Ar^{40}(n,\gamma)Ar^{41}$	99,6	0,53	1,85 с	0,99	γ – 1,29 β – 1,2	–
CO_2	Активация изотопов кислорода (аналогично воде)						
Орган. теплоноситель	*Собственная активность низкая. Определяющей является активность примесей. Состав примесей примерно такой же, как и в воде*						

*) реакция пороговая, сечение усреднено по центру деления.

**) в результате реакции появляется 1 нейтрон на акт распада с E_n = 1 МэВ

Таблица 7

Длина релаксации и фактор первоначального накопления различных материалов для потока быстрых нейтронов E > 1,5 МэВ и дозы быстрых нейтронов

Вещество	Плотность, г/см^3	Начальная энергия нейтронов источника								
		E_0=4 МэВ		E_0=14,9 МэВ		Спектр деления (1,5<E<2,5 МэВ)				
		λ	B	λ	B	0–30 см	30–50 см	50–90 см	90–120 см	Более 120 см
H_2O	1	6,3	5,4	13,2	3,0					
B_4C	1,67	12,0	5.0	17,2	1.8	8,9	10,2			
C	1,67	11,4	1,4	19,7	1.3	11,4	12,0	13,7	14,4	15,5
Na	0,96					26	26	26	26	
Al	2,7	14,1	3,5	15,8	2,5	12,0	12,0			
Fe	7,83	7,6	4,9	8,2	2,7	7,6	7,6	7,6	7,6	
Pb	11,3	15,0	4,0	15,3	2,9	12,6	12,8			
Полиэтилен	0,92	5,5	2,4	13,9	2,5	7,1	7,2	7,5	7,8	
Плексиглас	1,18	6,2	2.1	15,0	2,1	8,8	8,9	9,2	9,6	
LiH	0,82					(6,5)	(6,7)	(7,9)		
ZrH_2	5,62					(4,9)	(5,5)	(6,3)	(6,5)	
ZrH	5,61					(6,5)	(6,8)	(7,4)	(7,6)	(7,6)
TiH_2	3,91					(4,3)	(4,7)	(5,8)		
TiH	3,79					(6,1)	(6,2)	(7,3)	(7,3)	(7,4)

* В скобках даны длины релаксации дозы.

Таблица 8

Длина релаксации быстрых нейтронов (см) на различной толщине бетонной защиты

Бетон	Номер бетона	Толщина защиты, м						
		0–0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0
Обычный $\rho = 2300$ кг/м^3	1	8,7	10,7	13,3	15,6	16,6	17,4	17,8
	4	7,9	9,6	12,0	14,1	15,0	15,7	16,1
	6	7,6	9,3	11,6	13,6	14,4	15,1	15,5
Гематитовый $\rho = 3200$ кг/м^3	1	7,1	8,7	10,9	12,7	13,6	14,2	14,6
	4	6,65	8,2	10,2	11,9	12,7	13,3	13,6
	6	6,4	7,9	9,85	11,6	12,3	12,9	13,3
На стальном скрепе $\rho = 4200$ кг/м^3	1	6,2	7,8	9,5	11,1	11,9	12,4	12,7
	4	5,9	7,3	9,05	10,6	11,3	11,8	12,1
	6	5,6	6,9	8,6	10,0	10,6	11,2	11,4

Таблица 9

Длина релаксации и сечение релаксации быстрых нейтронов из водо-водяного реактора в графите, железе, свинце

Энергия нейтронов МэВ	Толщина слоя, см													
	графит								железо		Свинец			
	0–30		30–60		60–90		90–135		0,65		0,30		30–75	
	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн	λ_{rel}, см	$\sigma\,1/\lambda$, барн
3–11	10,5	1,13	13,2	0,90	14,0	0,85	15,7	0,76	6,4	1,86	10,3	2,96	9,8	3,12
5–11	13,2	0,9	14,1	0,85	15,7	0,76	16,5	0,73	6,1	1,95	9,7	3,15	9,6	3,18
7–11	15,7	0,76	16,7	0,72	17,8	0,68	18,3	0,65	6,1	1,95	9,8	3,12	9,7	3,15
0,7–1,5	11,9	1,0	12,5	0,95	12,8	0,93	15,1	0,79	8,5	1,4	15,4	1,98	15,8	1,93
1,5–2,5	11,2	1,06	12,0	0,99	13,1	0,91	15,2	0,78	7,8	1,53	12,6	2,42	12,8	2,38
2,5–4,0	10,4	1,18	11,5	0,03	12,6	0,94	14,7	0,81	6,8	1,75	10,9	2,80	10,5	2,90
4,0–10,0	11,5	1,03	12,6	0,94	14,7	0,81	16,7	0,71	6,1	1,95	9,8	3,12	9,5	3,23

Таблица 10

Дозовые факторы накопления (по отношению к быстрым нейтронам) для толщины защиты более 1 м (а для бетона ρ = 2300, более 3 м)

Плотность, кг/м^3	Промежуточные нейтроны E<1,5 МэВ						Тепловые					
	Номер бетона						Номер бетона					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
2300	10,3	3,4	2,3	1,9	1,8	1,6	2,05	2,8	0,95	0,61	0,58	0,50
2600	2,0	1,4	1,1	1,0	0,9	0,9	0,12	0,10	0,08	0,05	–	–
3200	4,2	3,0	2,7	2,3	2,1	1,9	0,11	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03
3500	6,3	3,6	2,5	2,5	2,1	2,0	0,35	0,19	0,15	0,13	0,12	0,11
3600	5,2	4,3	3,4	3,0	2,4	1,8	0,10	0,08	0,07	0,06	0,12	–
4200	7,4	6,2	5,0	3,9	3,4	2,2	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	–
4600	11,7	6,1	5,4	3,4	2,8	2,3	0,11	0,08	0,05	0,03	0,02	–
5200	23,2	6,0	4,3	3,5	–	–	0,29	0,09	0,03	0,01	0,02	–

Таблица 11

Дозовые факторы накопления для плоского изотропного источника в бесконечной среде

Eγ, МэВ	μx						μx					
	1	2	4	7	10	15	1	2	4	7	10	15
Вода							Алюминий					
1,0	3,62	5,52	9,64	17,2	27,2	51,8	3,15	4,69	8,04	14,2	22,4	43,0
2,0	2,64	3,72	5,80	9,07	12,7	20,3	2,24	3,43	5,33	8,37	11,9	19,4
3,0	2,26	3,06	4,53	6,70	8,95	12,8	2,21	2,98	4,45	6,68	9,13	14,1
4,0	2,06	2,72	3,92	5,62	7,32	10,4	1,99	2,60	3,74	5,40	7,15	10,5
6,0	1,08	2,28	3,16	4,37	5,55	7,63	1,82	2,32	3,22	4,51	5,84	8,42
8,0	1,62	1,99	2,65	3,55	4,41	5,92						
10,0	1.52	1,84	2,40	3,15	3,86	5,06	1,48	1,78	2,34	3,16	4,03	5,70
Железо							Свинец					
0,5	2,93	4,33	7,39	13,0	20,4	38,1	1,34	1,51	1,77	2,06	2,31	2,74
1,0	2,77	4,01	6,61	11,2	16,8	29,7	1,56	1,88	2,43	3,14	3,80	4,96
2,0	2,28	3,14	4,86	7,68	10,9	17,9	1,58	1,96	2,70	3,85	5,14	7,77
3,0	2,14	2,89	4,38	6,77	9,48	15,1	1,52	1,89	2,66	4,02	5,73	9,80
4,0	1,86	2,43	3,55	5,35	7,40	11,6	1,45	1,79	2,54	3,99	6,04	11,6
6,0	1,66	2,10	3,01	4,53	6,32	10,2	1,34	1,61	2,30	3,90	6,61	15,9
8,0	1,47	1,80	2,49	3,67	5,11	8,33	1,25	1,47	2,07	3,62	6,51	17,0
10,0	1,37	1,64	2,24	3,34	4,78	8,30	1,16	1,32	1,78	3,04	5,50	15,0

Таблица 12

Энергии захватных квантов

Вещество	Число γ-квантов на 1 захват	Средняя энергия γ-квантов, МэВ.
Al	1,5	4,9
Be	1,3	5,4
Bi	1,0	4,2
B	1,0	0,5
Cd	2,3	2,2
Ca	2,1	4,5
C	1,3	3,5
Cr	1,5	5,2
Co	0,9	5,3
Cu	0,9	6,2
H	1,0	2,2
Fe	1,1	6,4
Pb	1,0	7,3
Mg	2,1	3,9
Mn	0,8	5,7
Hg	1,3	4,6
Mo	1,1	4,6
Ni	1,2	7,0
N_2	1,7	6,1
Бетон (обыч)	1,0	6,0
K	1,2	4,4
Si	3,9	3,9
Na	2,4	2,3
Sn	1,8	4,5
Zn	0,9	5,4

Таблица 13

Длина релаксации быстрых нейтронов в веществах, см

Вещество	Энергия нейтронов, Мэв			
	4 МэВ		14,9МэВ	
	λ, см	B*	λ, см	B*
Вода	6,3	5,4	13,2	3,0
Полиэтилен	5,5	2,4	13,9	2,5
Углерод	11,4	2,0	19,2	2,0
Al	14,1	2,5	15,8	2,5
Железо	7,6	25	8,2	2,7

_____

B* – фактор первоначального накопления (зависит от геометрии опыта).

Определение тепловыделения в бетоне от γ-квантов

Известно, что 10^{13} МэВ/с = 1,6 Вт. Для получения тепловыделения в бетонах в единицах (МВт / см^3) от γ-излучения необходимо умножить $q\gamma$ – плотность поглощений γ-излучения, на коэффициент κ.

Таблица 14

Значения коэффициента к ($\frac{МВт \cdot с}{см^3}$)

для расчета тепловыделений в бетоне

Источник γ-квантов	Поглотитель γ-квантов	
	Серпантинтовый бетон	Шалютный бетон
Сталь	26,2	25,6
Серпантинтовый бетон	18,2	17,8
Шалютный бетон	27,3	26,7

Таблица 15

Линейные μ коэффициенты поглощения γ-излучения

E, МэВ	H_2O	Fe	K	Na	C	$\overline{U}$
	μ (см$^{-1}$)	μ (см$^{-1}$)	μ (см$^{-1}$)	μ (см$^{-1}$)	μ (см$^{-1}$)	μ (см$^{-1}$)
0,5	0,096	0,659	0,074	0,081	0,0145	3,46
1,0	0,070	0,470	0,053	0,059	0,106	1,457
2,0	0,049	0,333	0,038	0,041	0,074	0,966
3,0	0,039	0,283	0,031	0,033	0,060	0,838
4,0	0,034	0,259	0,028	0,029	0,051	0,825
5,0	0,030	0,246	0,026	0.026	0,045	0,834
6,0	0,027	0,239	0,025	0,024	0,041	0,851
8,0	0,024	0,232	0,023	0,022	0,036	0,896
10,0	0,022	0,231	0,023	0,021	0,032	0,956

Таблица 16

Линейные коэффициенты ослабления γ-квантов

в железоводном экране C_{Fe} = 0,7

Энергия, МэВ	μ, (см$^{-1}$)
1–2	0,272
2–3	0,216
3–4	0,203
4–5	0,186
5–7	0,177
7–9	0,170

Таблица 17

Константы формулы Тейлора для железоводной защиты $C_{Fe} = 0,7$

E, МэВ	A	$-\alpha_1$	α_2
1–2	4,8	0,082	0,220
2–3	3,9	0,084	0,180
3–5	3,25	0,086	0,134
5–7	2,45	0,093	0,114
7–9	2,45	0,084	0,153

Таблица 18

Массовый коэффициент поглощения энергии γ-квантов

$\left[\bar{\bar{\mu}}_{эк} = \frac{\bar{E}}{E}\bar{\mu}\right]$ *используемый в расчетах тепловыделения (см²/г)*

E, МэВ	Вещество			
	C	H_2O	Бетон(2,3)	Fe
0,5	0,0297	0,0330	0,0296	0,0294
1,0	0,0280	0,0311	0,0278	0,0261
2,0	0,0237	0,0264	0,0239	0,0231
3,0	0,0209	0,0233	0,0216	0,0224
4,0	0,0190	0,0213	0,0203	0,0224
5,0	0,0177	0,0198	0,0194	0,0227
6,0	0,0166	0,0188	0,0188	0,0231
8,0	0,0153	0,0173	0,0180	0,0239
10,0	0,0145	0,0165	0,0177	0,0250

Таблица 19

Параметры материалов для теплового расчета защиты

Параметр	Сталь	Жаростойкие бетоны		Обычный бетон
		Шалютный	Серпентинитовый	
Плотность, кг/м³	7800	2100	2150	
Предельная рабочая температура, °С		1000	500	300
Содержание водорода, вес %	0	0,1	1,1	
Теплопроводность МВт/ см °С	477	8,4	8,4	
Возраст нейтронов τ, см²	1240	530	79	
Длина диффузии, L см	1,48	15,6	8,1	
Σ_a, $см^{-1}$	0,096	0,00405	0,00844	
Отношение D/L	1,141	0,0635	0,00681	
Средняя энергия, выделяемая при захвате теплового нейтрона E, МэВ	7,6	7,92	5,3	

Таблица 20

Число нейтронов энергией, большей E (χ_E), образующихся в активной зоне на одно деление

E, МэВ	χ_E
0,4	0,90
0,5	0,87
1,0	0,69
1,4	0,56
2,0	0,40
3,0	0,21
4,0	0,11
5,0	0,054
6,0	0,026
7,0	0.012
8,0	0,005
9,0	0,002
10,0	0,001

Таблица 21

Сечение выведения различных элементов для нейтронов спектра деления

Вещество	$\sigma_{выв}$, барн	Вещество	$\sigma_{выв}$, барн
Водород	1,00	*Ванадий*	1,77
Дейтерий	0,88	Хром	1,77
Литий	1,01	Марганец	1,79
Бериллий	1,07	Железо	1,98
Бор	0,97	Кобальт	2,02
Углерод	0,81	Никель	1,89
Азот	0,99	Медь	2,04
Кислород	1,07	Цинк	2,12
Фтор	1,29	Цирконий	2,36
Натрий	1,26	Молибден	2,38
Магний	1,29	Кадмий	2,73
Алюминий	1,31	Барий	3,33
Кремний	1,20	Вольфрам	2,51
Фосфор	1,33	Свинец	3,53
Сера	1,61	Висмут	3,49
Хлор	1,20	Уран	3,60
Калий	1,50	Вода	2,92
Кальций	1,60	Полиэтилен	2,84
Титан	1,72	Тяжелая вода	2,76

Таблица 22

Длина релаксации быстрых нейтронов в бетонах, ($\lambda_{рел}$, см)

Плотность бетона, кг/м^3	Номер бетона					
	1	2	3	4	5	6
2300	13,1	12,6	12,2	11,8	11,5	11,4
2600	12,4	14,4	11,8	9,8	9,6	9,4
3200	10,7	10,2	10,1	10,0	9,9	9,7
3500	11,4	10,8	10,7	10,4	10,3	10,2
3600	9,8	9,5	9,4	9,3	8,9	8,7
4200	9,4	9,3	9,2	8,9	8,8	8,4
4600	9,0	8,8	8,6	8,3	8,2	8,1
5200	8,3	7,9	7,7	7,5	–	–

Таблица 23

Сечение для тепловых нейтронов

Элемент	Ат. вес	Плотность, 20 °С, г/см^3	σ_a, барн	σ_s, барн
H	1,00	–	0,33	38
Li	6,94	0,534	71,0	1,4
Be	9,01	1,8	0,01	7,0
B	10,8		755	4,0
C	12,0	1,65	0,0032	4,8
N	14,0		1,88	10,0
O	16,0		<0,0002	4,2
F	19,0		<0,01	3,9
Na	22,9	0,971	0,5	4,0
Mg	24,3	1,74	0,063	3,6
Al	26,9	2,69	0,23	1,4
Si	28,0	2,42	0,13	1,7
Ar	39,9		0,62	1,5
K	39,0	0,87	1,97	1,5
Ca	40,0	1,55	0,43	9,0
Ti	47,9	4,5	5,6	4,0
V	50,9	5,96	5,1	5,0
Cr	52,0	7,1	2,9	3,0
Mn	54,9	7,2	13,2	2,3
Fe	55,8	7,87	2,53	11,0
Co	58,9	8,9	37,0	7,0
Ni	58,69	8,9	4,6	17,5
Cu	63,54	8,94	3,69	7,2
Zn	65,38	7,14	1,06	3,6
Zr	91,2	6,4	0,18	8,0

Окончание табл. 23

Элемент	Ат. вес	Плотность, 20 °С, г/см^3	σ_a, барн	σ_s, барн
Sr	87,6	2,54	1,16	10,0
Nb	92,9	8,4	1,1	5,0
Mo	95,9	10,2	2,5	7,0
Ag	107,8	10,5	62,0	6,0
Cd	112,4	8,65	2550	7,0
In	114,7	7,28	190	2,2
J	126,9	4,93	6,7	3,6
Xe	131,3		35,0	4,3
Cs	132,9	1,87	29,0	20,0
Ba	137,3	3,5	1,17	8,0
Sm	150,4	7,75	5500	–
Eu	152,0		4600	8,0
Gd	156,9		4600	–
Dy	162,0		1100	100
Hf	178,6	13,3	105	8,0
Ta	180,8	16,6	21,3	5,0
W	183,9	19,3	19,2	5,0
Ir	193,1	22,4	430	–
Pt	195,0	21,37	8,1	10
Au	197,2	19,32	98	9,3
Hg	200,0	13,54	380	20
Pb	207,0	11,35	0,17	11,0
Bi	209,0	9,74	0,032	9,0
Th	232.12	11,3	7,0	–
U	238,07	18,68	7,68	–

Таблица 24

Длина релаксации γ-квантов в различных бетонах, см

Плотность бетона, кг/м^3	Номер бетона					
	1	2	3	4	5	6
2300	6,4	9,7	11,9	13,7	16,2	18,0
2600	6,2	8,7	10,6	12,1	13,0	15,0
3200	5,1	7,2	8,5	9,6	10,5	11,8
3500	5,1	7,3	8,5	9,0	9,9	9,9
3600	4,3	6,6	7,4	8,3	9,5	10,1
4200	3,9	5,5	6,6	7,2	8,0	8,5
4600	3,6	5,0	6,0	6,5	7,3	7,6
5200	3,2	4,5	5,3	5,9	6,4	6,7

Таблица 25

Константы и параметры тепловых нейтронов

Материал	Плотность, г/см^3	D, см	Σ_a, см$^{-1}$	L, см	τ, см	Примечание
H_2O	1,0	0,14	0,022	2,85	31	–
D_2O	1,1	0,85	$2{,}9\cdot10^{-5}$	116	125	
Графит	1,67	0,89	$3\cdot10^{-3}$	58	355	–
Be	1,85	0,53	$1{,}2\cdot10^{-3}$	20,8	86	
Na	0,93	3,37	0,013	16	10700	–
Fe	7,8	0,36	0,222	1,26	160	–
U^{238}	18,7	0,69	0,128	1,47	4160	–
Al	2,7	3,07		20,0		–
Бетон	2,3	0,531	0,0089	7,75	101	Количество водорода кг/м^3; 23,0
Бетон	3620	0,418	0,060	5,0	75,4	21,7
Бетон	4500	0,365	0,0339	3,27	69	22,1
Свинец	11,35	0,92		12,8		–
Портланд-цемент	2,3	0,89		7,04		–

Таблица 26

Массовые и линейные коэффициенты преобразования энергии для воздуха

hν, МэВ	$\gamma_{м.}$, см^2/гр.	γ, $\cdot 10^{-3}$ см$^{-1}$
0,010	4,54	5,87
0,015	1,25	1,616
0,020	0,502	0,649
0,050	0,0376	0,0486
0,100	0,0231	0,0299
0,500	0,0299	0,0387
1,00	0,0273	0,0361
1,50	0,0255	0,0330
2,00	0,0234	0,0303
3,00	0,0205	0,0265
4,00	0,0185	0,0239
5,00	0,0173	0,0224
6,00	0,0163	0,0211
8,00	0,0150	0,0194
10,0	0,0143	0,0185

Таблица 27

Значение возраста нейтронов для бетонов различного состава постоянной плотности (состав бетона приведен в [4, стр. 166])

Плотность бетона, Кг/м^3	Количество водорода, кг/м^3	τ, см^2
2300	2,30	541
	8,22	230
	14,30	139
	18,90	104
	25,60	81
2600	20,2	92
	33,3	58
	54,6	31
3200	9,6	162
	17,2	97
	27,2	63
3600	9,0	158
	17,6	88
	32,0	47
4200	9,65	175
	17,60	100
	31,00	56
4600	8,3	204
	15,2	120
	27,6	60
5200	7,8	224
	18,2	106
	27,0	67
3500 баритовый	6,67	270
	17,5	110
	28,0	67

Таблица 28

Значение фактора накопления B(μx) для обычного бетона (плотность 2300 кг/м^3, $z_{эфф}$ = 15)

μx	Энергия квантов, МэВ						$B=\frac{1}{2}\mu x+1$
	1	2	3	4	6	8	
1	2,1	1,7	1,6	1,4	1,3	1,3	1,5
2	3,5	2,6	2,3	2,1	1,6	1,5	2,0
4	7,0	4,6	3,8	3,1	2,4	2,2	3,0
7	14,0	8,3	6,2	5,0	3,3	3,0	4,5
8,5	18,5	9,6	7,4	5,95	3,8	3,4	5,2
10	23,0	11,0	8,6	6,9	4,3	3,8	6,0

Окончание табл. 28

μx	Энергия квантов, МэВ						$B=\frac{1}{2}\mu x+1$
	1	2	3	4	6	8	
12,5	32,5	15,0	10,8	8,4	5,1	4,5	7,2
15	42,0	19,0	13,0	10,0	6,0	5,4	8,5
20	63,0	27,0	16,0	13,0	7,6	7,0	11,0

Таблица 29

*Значение коэффициентов формулы Тейлора *)*
для обычного бетона и различных энергий γ-квантов

E_0, МэВ	A	α	β
0,5	12,5	0,1110	0,0100
1	9,9	0,0880	0,0230
2	6,3	0,0680	0,0580
4	3,9	0,0590	0,0790
6	3,1	0,0585	0,0830
8	2,7	0,0570	0,0855
10	2,6	0,0500	0,0835

*) $B(\mu_0 x) = A\exp(\alpha\mu_0 x) + (1 - A)\exp(-\beta\mu_0 x)$
Справедливо для μx = 1 – 20

Таблица 30

Сечение упругого (σ_s) рассеяния нейтронов, барн

Элемент	Энергия, МэВ		
	1,0	5,0	8,0
H^1	4,0	1,6	1,3
N^{14}	2,0	1,5	1,9
O^{16}	8,0	2,0	1,4
C^{13}	–	2,0	1,2

Таблица 31

Выход захватных квантов на один поглощенный нейтрон,
$\nu_f(E)$, в бетонах

Плотность бетона кг/м^3	Номер бетона	Энергия квантов, МэВ				
		2	3	4	6	8
2300	1–2	0,310	0,310	0,170	0,412	0,216
	3–6	0,359	0,359	0,575	0,269	0,137
2600	1–3	0,118	0,162	0,298	0,210	0,404
	4–6	0,159	0,159	0,204	0,186	0,375
3200	1–6	–	–	0,212	0,208	0,440

Окончание табл. 31

Плотность бетона кг/м^3	Номер бетона	Энергия квантов, МэВ				
		2	3	4	6	8
3500	1–6	0,262	0,262	0,489	0,276	0,175
3600	1–6	–	–	0,282	0,213	0,443
4200	1–6	–	–	0,238	0,218	0,490
4600	1–6	–	–	0,238	0,219	0,503
5200	1–6	–	–	0,238	0,224	0,505

Таблица 32

Значение величины в бетонах

Плотность, кг/м^3	Количество водорода, кг/м^3	L, см	Σ_a, см$^{-1}$	D_{th}, см	L, см
2300	23,0	101	0,0089	0,531	7,75
3620	21,7	75,4	0,060	0,418	5,0
4500	22,1	69	0,0339	0,365	3,27

Таблица 33

Минимальная толщина слоя воды, обеспечивающая постоянство сечения выведения для различных веществ, r_0, см

Вещество	Энергия, МэВ			
	0,5	1,0	3,0	15,0
C	23	19	42	60
Na	12	20	–	–
Fe	23	19	45	69
Ni	10	19	57	72
Pb	10	19	65	71
Нерж. Сталь 1х18н9т	10	19	–	–

Таблица 34

Величина эффективного макросечения ослабления быстрых нейтронов

Вещество	Удельный вес кг/м^3	$\Sigma_{\text{цл}}$; $\frac{см^{-1}}{г/см^3}$	
		4 МэВ	14,9 МэВ
Вода	1000	0,1580	0,0760
Полиэтилен	900	0,2020	0,0800
Плексиглас	1100	0,1470	0,0610
Карбид бора	1670	0,0500	0,0350
Графит	1670	0,0520	0,0310
Алюминий	2700	0,0260	0,0230
Железо	7830	0,0170	0,0155
Свинец	11300	0,0059	0,0058

Таблица 35

Экспериментальные значения $B_н^{доз}$ для 3–4 длин свободного пробега

Материал	$B_н^{доз}$
Вода	$2,0 \pm 0,3$
Полиэтилен	$2,0 \pm 0,3$
Полиэтилен с бором	$1,7 \pm 0,3$
Серпентиновый бетон	$2,3 \pm 0,2$

Таблица 36

Сечения выведения нейтронов с энергией Е 7 МэВ в некоторых материалах

Материал	вода	натрий	графит	железо	свинец
$\Sigma_{выв}$, $см^{-1}$	0,091	0,036	0,063	0,159	0,102

Таблица 37

Экспериментальные значения длины релаксации для некоторых бетонов

Номер бетона	Бетон	Плотность бетона кг/м^3	Энергия нейтронов МэВ	Толщина бетона, м	λ_{rel} см
1а	Обычный	2400	1,5	0,2–0,8	11
1а	Обычный	2400	1,5	0,8–1,2	16
1б	Обычный	2300	Быстрые	Равновесн. спектр	11,1
1 в, с, д, е	Обычный	2300–2390		0,2–0,8	12,2
2а	Лимонитовый	2700	1,5	0,8–1,2	9
2а				0,2–1,2	13
3а	Серпантиновый	2200	0,9–1,5		11,8
			3		10,7
			7	0,3–0,8	12
4а	Гипсовый с гематитом	2660	Быстрые	0,3–0,6	9,06
4 б, в		2430–2360			10,2–11,2
5а	Беритовый	3500	1		8,3
5 б, в		3500–3460	быстрые		12,5
6а	Магнетитовый	3290			9,52
7а	На стальном скрепе	4640			8,75
8а	На стальной дроби	5900			6

Таблица 38

Отношение потока замедляющих нейтронов к потоку быстрых нейтронов (E > 1,5) для источника спектра деления в воде, углероде, карбиде бора

$\bar{E}$, МэВ	ΔE, МэВ	B (τ)		
		H_2O ρ=1,0 г/см^3	C ρ=1,67 г/см^3	B_4C ρ=1,67 г/см^3
0,64500	0,75–0,50	0,1100	0,7230	0,9540
0,39400	0,50–0,35	0,0947	0,0726	0,7270
0,16400	0,35–0,060	0,2700	2,9900	2,3130
0,04150	0,060–0,025	0,0878	1,5310	0,5430
0,01350	$0{,}025–0{,}50\cdot10^{-2}$	0,1350	2,9200	0,4290
0,00234	$0{,}50\cdot10^{-2}–0{,}85\cdot10^{-3}$	0,1470	4,0000	0,0403
$0{,}407\cdot10^{-3}$	$0{,}85\cdot10^{-3}–0{,}15\cdot10^{-3}$	0,1470	4,7900	$0{,}234\cdot10^{-3}$
$0{,}707\cdot10^{-4}$	$0{,}15\cdot10^{-3}–0{,}20\cdot10^{-4}$	0,1520	6,0100	$0{,}957\cdot10^{-7}$
$0{,}745\cdot10^{-5}$	$0{,}20\cdot10^{-4}–0{,}20\cdot10^{-5}$	0,2080	10,0400	0
$0{,}13\cdot10^{-5}$	$0{,}20\cdot10^{-5}–0{,}10\cdot10^{-5}$	0,0737	4,3600	0
$0{,}612\cdot10^{-6}$	$0{,}10\cdot10^{-5}–0{,}37\cdot10^{-6}$	0,0885	5,7000	0
$0{,}106\cdot10^{-6}$	$0{,}37\cdot10^{-6}–0{,}23\cdot10^{-7}$	0,2770	22,5000	0
тепловые		5,8170	–	0

Таблица 39

Спектр γ-излучения при радиационном захвате тепловых нейтронов

Ядро	Сечение захвата тепловых нейтронов, барн	Интервал энергии, МэВ					$E_{\gamma max}$, МэВ
		0–1	1–3	3–5	5–7	>7	
H	0,335	0	1	0	0	0	2,23
C	$3{,}75\cdot10^{-3}$	0	0	1	0	0	4,95
Na	0,47	0,96	3,14	0,7	0,31	0	6,41
Cr	3,1	0,85	0,62	0,12	0,23	0,45	9,72
Fe	2,62	0,75	0,87	0,23	0,25	0,40	10,16
Ni	4,6	0,84	0,63	0,23	0,34	0,63	9,0
Pb	0,17	0	0	0	0,07	0,93	7,38
238U	2,71	2,54	2,69	0,34	0	0	4,06

Таблица 40

Сечения выведения различных элементов, $\sigma_{выв}$, барн

вещество	Энергия, МэВ					
	0,2	0,5	1,0	1,2	3,0	15
Be					2,31	1,04
B					1,38	0,82
C	3,16	3,16	2,08	–	1,58	0,92
O					0,48	0,70
Na	2,5	2,5	2,5	2,8	–	–
Al					1,68	1,24
S					1,4	1,58
Ti					2,4	1,54
Fe	2,36	2,36	1,04		1,96	1,53
Ni	4,3	4,3	2,0		1,9	1,59
Cu					2,3	1,8
Zn					1,73	1,64
Zr					2,77	1,9
W					4,8	3,6
Pb	1,2	1,2	2,87		3,72	3,39
Bi					3,78	3,35
BeO					2,79	1,76
B_4 C					7,1	4,18
C_6 H_6					20,5	9,2
Pb_3 O_4					13,5	

Таблица 41

Массовый коэффициент ослабления γ-квантов, 10^{-3} ($м^2$/кг), в различных материалах

Материал	Плотность, кг/$м^3$	Энергия γ-квантов, МэВ					
		1	2	3	4	6	8
Вода	1000	7,06	4,93	3,96	3,39	2,76	2,41
Боритовая руда	1900	6,25	4,37	3,54	3,07	2,57	2,30
Карбид бора	2520	6,05	4,28	3,56	2,84	2,21	2,0
Барит	4200	6,04	4,28	3,69	3,42	3,22	3,18
Сталь	7800	5,94	4,24	3,60	3,30	3,04	2,95

Таблица 42

Возраст нейтронов спектра деления в различных веществах τ, $см^2$, выборочно

Вещество	Плотность, г/$см^3$	Энергия								
		6,5–10,5 МэВ	2,5–4,0 МэВ	0,8 – 1,4 МэВ	0,4–0,8 МэВ	0,1–0,2 МэВ	46–100 кэВ	46–100 эВ	4,6–2,1 эВ	тепловые
Сталь 1х18н9т	7,9	18,0	19,4	72,0	164	291	333	484	512	525
Na	0,97	426	508	706	859	1533	1865	4519	6368	7493
Al	2,7	72,2	82,7	183	288	458	665	6106	7949	9043
Fe	7,86	18,2	21,1	94,0	343	753	917	3140	3165	3177
Pb	11,3	40,4	72,3	306	1014	1473	1624	3443	4165	4631
C	1,6	107	81,9	117	127	144	156	265	314	357
H_2O	1,0	37,4	24,1	19,4	19,8	21,5	22,0	25,3	26,6	27,6
Be	1,84	22,7	14,3	31,5	31,1	35,8	38,3	59,8	69,4	76,5
Ст3 0,2 % – C 0,6 % Mn	7,32	18,1	21,0	91,4	314,6	669,1	806,9	1732	1756	1768
Бористая сталь 30 % вес B 70 % вес Fe		16,3	19,3	65,7	138,9	228,4	268,2	410,1	412,0	412,2

Таблица 43

Зависимость углового коэффициента быстрых нейтронов с E > 1,0 МэВ от толщины экрана из графита

Толщина экрана, см	Угловой коэффициент A		
	Изотропный источник	Косинусоидальный источник	Мононаправленный источник
20	1,57	1,58	
30	1,60	1,66	
40	1,70	1,86	1,85

Таблица 44

Возраст нейтронов спектра деления в различных веществах τ, $см^2$, выборочно

Вещество	Плотность, $г/см^3$	Энергия					
		1,4 МэВ	0,7–0,4 МэВ	0,2–0,1 МэВ	410–150 эВ	2,7–1,0 эВ	Тепловые
U	18,9	18,6	70,1	109,6	148,0	546,2	565,5
80 % C 20 % Fe	2,9	69,8	99,4	123,6	214,3	272,1	282,5
20 % C 80 % Fe	6,57	35,8	119,1	182,0	316,4	357,0	362,3
80 % C 20 % Fe	2,9	65,8	88,4	103,0	128,2	128,8	128,8
20 % C 80 % Fe	6,57	35,2	108,8	159,7	228,9	232,6	232,0
80 % H_2O 20 % U	4,58	21,1	20,8	22,4	25,9	28,5	29,0
20 % H_2O 80 % U	15,3	19,0	31,8	36,0	45,5	55,6	57,2
80 % H_2O 20 % Pb	3,07	26,5	25,1	26,9	31,0	33,9	34,4
20 % H_2O 80 % Pb	9,27	60,6	80,5	86,5	106,0	120,8	123,4
80 % H_2O 20 % Fe	2,36	22,8	22,4	24,0	27,7	30,0	30,4
20 % H_2O 80 % Fe	6,44	27,2	46,7	53,8	65,1	71,0	71,9

Таблица 45

Длина релаксации быстрых нейтронов в полиэтилене ($\gamma = 0,92$ $г/см^3$)

Энергия нейтронов, МэВ	Толщина защиты, см			
	0–30	30–60	60–90	90–150
E>1,5	7,2	7,6	8,1	8,5
E>2,6	7,7	7,8	8,2	8,6

Таблица 46

Образование гамма-квантов
при неупругом рассеянии нейтронов спектра деления

Элемент	E_γ, МэВ	$E_{n,пор}$, МэВ	$\overline{\sigma_{in,\gamma}}$, барн	ν_{in}, отн. ед.
Na	0,44	0,46	0,50	1,00
	1,64	2,17	0,15	0,24
Al	0,84	0,87	0,08	0.18
	1,01	1,05	0,19	0,38
	1,73	2,83	0,17	0,10
	2,21	2,29	0,20	0,30
	2,73	2,83	0,06	0,07
	2,98	3,09	0,13	0,17
Ti	0,99	1,01	0,05	1,12
	1,31	2,48	0,53	0,51
	2,43	2,48	0,11	0,10
Mn	0,86	1,0	0,24	0,21
	1,16	1,31	0,11	0,08
	1,53	1,56	0,18	0,13
	1,88	1,91	0,12	0,06
	2,30	2,47	0,19	0,10
	2,85	2,90	0,12	0,06
Fe	0,85	0,86	0,74	0,88
	1,25	2,12	0,25	0,21
	1,86	2,70	0,22	0,18
	2,123	3,0	0,20	0,15
	2,66	2,70	0,16	0,13
	3,6	3,7	0,26	0,20
Ni	0,83	2,20	0,13	0,14
	1,33	1,47	0,76	0,94
	1,8	3,18	0,05	0,04
Zr	0,93	0,94	0,51	0,59
	1,21	1,22	0,07	0,06
	1,42	2,38	0,11	0,08
	2,2	2,22	0,51	0,37
Pb	0,8	0,82	0,62	0,78
	1–2	0,85	0,33	0,40
	2,62	2,62	0,67	0,39

Таблица 47

Характеристики изотопов, определяющие собственную активность теплоносителя

Материнский изотоп	Содержание изотопа в природном элементе	Реакция активации	Продукт активации	Период полураспада	Энергия активационного излучения, МэВ	Выход излучения на распад
^{16}O	99,8	(n,p)	^{16}Na	7,35 с	6,13(γ) 7,1(γ)	0,76 (γ) 0,06 (γ)
^{17}O	0,039	(n,p)	^{17}Na	4,1 с	1 (нейтроны)	0,9 (нейтроны)
^{23}Na	100	(n,γ)	^{24}Na	15,1 ч	1,38(γ) 2,76(γ)	1,0(γ) 1,0(γ)
^{23}Na	100	(n,2n)	^{22}Na	2,6 лет	1,26(γ)	1 (γ)

Таблица 48

Характеристики изотопов, определяющие примесную активность теплоносителя реакторных установок

Материнский изотоп	Содержание изотопа в природном элементе	Реакция активация	Продукт активации	Период полураспада	Энергия активационного излучения, МэВ	Выход излучения на распад
^{2}H	0,015	(n,γ)	^{3}H	12,26 г	0,0186	1(β)
^{6}Li	7,52	945(n,α)	^{3}H	12,26 г	0,0186	1(β)
^{23}Na	100	0,53(n,γ)	^{24}Na	15,1 ч	2,76 1,38	1(γ) 1(γ)
^{37}Cl	24,5	0,56(n,γ)	^{38}Cl	37,7 мин	1,6 2,15	0,31(γ) 0,47(γ)
^{40}Ar	99,6	0,53(n,γ)	^{41}Ar	1,86 ч	1,29	0,99(γ)
^{41}K	6,91	1,15(n,γ)	^{42}K	12,46 ч	1,52	0,18(γ)

Таблица 49

Зависимость углового коэффициента промежуточных нейтронов (0,1 < E < 1,0 МэВ) от толщины экрана из графита

Толщина экрана, см	Угловой коэффициент А		
	Изотропный источник	Косинусоидальный источник	Мононаправленный источник
20	0,85	0,87	0,77
30	0,95	0,87	0,85
40	0,96	0,97	1,05

Таблица 50

Дозовые факторы накопления точечного изотропного источника в барьерной геометрии $B_б^D(E_\gamma, Z, \mu x) = \delta_D(E_\gamma, Z)\, B_\infty^D(E_\gamma, Z, \mu x)$

E_γ, МэВ	μx					
	1	2	4	7	10	15
Вода						
0,5	1,89	3,85	10,7	29,2	58,4	134
1,0	1,70	2,96	6,11	12,9	21,6	40,1
2,0	1,63	2,47	4,35	7,55	11,1	17,4
3,0	1,56	2,24	3,61	5,75	7,98	11,8
4,0	1,49	2,04	3,14	4,83	6,53	9,40
6,0	1,39	1,84	2,65	3,84	4,98	6,80
8,0	1,34	1,69	2,33	3,24	4,12	5,50
10,0	1,30	1,59	2,13	2,90	3,62	4,76
Железо						
0,5	1,76	2,68	5,20	10,1	16,7	30,8
1,0	1,69	2,61	4,86	9,18	14,7	25,5
2,0	1,63	2,26	3,84	6,73	10,1	16,4
3,0	1,46	2,03	3,32	5,50	8,02	12,7
4,0	1,39	1,85	2,91	4,70	6,80	10,7
6,0	1,30	1,67	2,51	4,03	5,85	9,60
8,0	1,25	1,53	2,19	3,43	4,99	8,36
10,0	1,18	1,40	1,92	2,95	4,29	7,42
Алюминий						
0,5	1,90	3,39	7,56	17,4	31,1	64,6
1,0	1,71	2,80	5,55	11,1	17,9	32,0
2,0	1,59	2,36	4,19	7,30	10,8	16,9
3,0	1,53	2,16	3,52	5,70	8,05	12,1
4,0	1,45	1,97	3,04	4,75	6,50	9,55
6,0	1,36	1,79	2,61	3,93	5,30	7,70
8,0	1,31	1,64	2,31	3,37	4,47	6,41
10,0	1,26	1,52	2,08	2,97	3,89	5,53

Окончание табл. 50

E_γ, МэВ	μx					
	1	2	4	7	10	15
Свинец						
0,5	1,22	1,39	1,66	1,97	2,23	2,61
1,0	1,35	1,67	2,22	2,98	3,69	4,75
2,0	1,38	1,74	2,48	3,62	4,78	6,80
3,0	1,33	1,67	2,41	3,77	5,25	8,35
4,0	1,26	1,55	2,23	3,58	5,40	9,73
6,0	1,17	1,39	1,96	3,31	5,65	13,7
8,0	1,13	1,29	1,73	2,87	5,05	14,02
10,0	1,11	1,22	1,57	2,51	4,32	12,4

Таблица 51

Отношение дозовых факторов накопления для барьерной геометрии к дозовым факторам накопления в бесконечной среде

для точечного изотропного источника $\delta_D(E_\gamma, Z) = \dfrac{B_b^D(E_\gamma, Z, \mu x)}{B_\infty^D(E_\gamma, Z, \mu x)}$

E_γ, МэВ	Вода	Al	Fe	Sn	Pb
0,5	0,750	0,799	0,869	0,941	0,983
1,0	0,830	0,845	0,903	0,952	0,986
2,0	0,892	0,905	0,929	0,965	0,989
3,0	0,924	0,930	0,943	0,974	0,990
4,0	0,941	0,946	0,956	0,979	0,993
6,0	0,961	0,965	0,973	0,986	0,994
8,0	0,970	0,976	0,983	0,986	0,995
10,0	0,974	0,983	0,987	0,984	0,996

Таблица 52

Дозовые характеристики моноэнергетического γ-излучения

Энергия фотонов *Eγ*, Мэв	Удельная *d*, Зв · м^2/фотон	Флюенс Ф, фотон /м^2, создающий $ПДД_А = 5 \cdot 10^{-2}$ Зв	$\varphi_{\gamma\ ДППА}$, фотон/(м^2·с)	Коэффициент изотропности *J*
$2\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-16}$	$3{,}1\cdot10^{14}$	$43\cdot10^{6}$	*2*
$3\cdot10^{-2}$	$7{,}2\cdot10^{-17}$	$6{,}9\cdot10^{14}$	$96\cdot10^{6}$	*2*
$5\cdot10^{-2}$	$3{,}1\cdot10^{-17}$	$1{,}6\cdot10^{15}$	$22\cdot10^{7}$	*2*
$1\cdot10^{-1}$	$3{,}9\cdot10^{-17}$	$1{,}3\cdot10^{15}$	$18\cdot10^{7}$	1,8
$2\cdot10^{-1}$	$9{,}8\cdot10^{-17}$	$5{,}1\cdot10^{14}$	$71\cdot10^{6}$	1,7
$5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-16}$	$2{,}0\cdot10^{14}$	$28\cdot10^{6}$	1,6,4

Окончание табл. 52

Энергия фотонов *Eγ*, Мэв	Удельная *d*, Зв · м^2/фотон	Флюенс Ф, фотон /м^2, создающий $ПДД_А = 5 \cdot 10^{-2}$ Зв	$\varphi_{\gamma\ ДППА}$, фотон/(м^2·с)	Коэффициент изотропности *J*
1	$4{,}8 \cdot 10^{-16}$	$1{,}0 \cdot 10^{14}$	$14 \cdot 10^6$	1,4
2	$8{,}3 \cdot 10^{-16}$	$6{,}0 \cdot 10^{13}$	$83 \cdot 10^5$	1,3
5	$1{,}6 \cdot 10^{-15}$	$3{,}1 \cdot 10^{13}$	$43 \cdot 10^5$	1,2
10	$2{,}9 \cdot 10^{-15}$	$1{,}8 \cdot 10^{13}$	$24 \cdot 10^5$	1,2
20	$4{,}3 \cdot 10^{-15}$	$1{,}2 \cdot 10^{13}$	$16 \cdot 10^5$	1,2

Таблица 53

Значения коэффициентов f, характеризующих отклонение от экспоненциальной формы кривой ослабления на начальных расстояниях от источника, для потоков нейтронов с энергией E > 1,5 МэВ

Материал	Энергия нейтронов *E*, МэВ					
	4	6	8	10	14	14,9
Алюминий	3,5	–	–	–	–	2,5
Вода	5,4	4,6	4,2	3,3	2,9	3,0
Графит	1,4	–	–	–	–	1,3
Железо	4,9	–	–	–	–	2,7
Полиэтилен	2,4	–	–	–	–	2,5
Свинец	4,0	–	–	–	–	2,9

Таблица 54

Длина релаксации λ нейтронов спектра деления для различных материалов барьерной геометрии (длина релаксации для бесконечной геометрии указана полужирным шрифтом), г/см^3

Материал	x, г/см^2	λ	
		$D_{б.н}$ (E > 0,33 МэВ)	$Ф_{б.н}$ (E > 2 МэВ)
Бетон	45–184	–	25,3
	>184	–	35,8
Вода	0–30	8,1	7,6 (8,1)
	30–60	8,9	9,1 (9,3)
	60–100	9,3	10,6 (10,7)
	0–100	–	9,0
Графит	0–50	–	18,9
	50–100	–	20,0
	100–150	21,1*	23,0 (21,7)
	150–220	26,8*	26,4(24,3)
	0–220	24	22,0
Железо	0–510	–	55,4 (59)

Окончание табл. 54

Материал	x, г/см^2	λ	
		$D_{б.н}$ (E > 0,33 МэВ)	$Ф_{б.н}$ (E > 2 МэВ)
Полиэтилен	0–28	–	5,78
	28–55	–	6,67
	55–83	–	7,63
	0–83	–	6,70
Свинец	0–840	–	117
* Для нейтронов с E > 0,5 МэВ			

Таблица 55

Значения керма-постоянных и гамма-постоянных широко используемых радионуклидов, δ = 30 кэВ (для радионуклидов с учетом γ-излучения, для дочерних продуктов – для равновесного состояния)

Радионуклид	$T_{1/2}$	$Г_{\delta}, \frac{а\,Гр \cdot м^2}{с \cdot Бк}$	$Г, \frac{Р \cdot см^2}{ч \cdot мКи}$
$^{22}_{11}$Na	2,603 года	77,3	11,8
$^{24}_{11}$Na	15,029 ч	118	18,1
$^{54}_{25}$Mn	312,16 сут	30,2	4,61
$^{59}_{26}$Fe	44,52 сут	40,5	6,18
$^{60}_{27}$Co	5,273 года	83,8	12,8
$^{65}_{30}$Zn	243,9 сут	20,0	3,06
$^{74}_{33}$As	17,77 сут	28,5	4,35
$^{85}_{36}$Кг	10,73 года	0,0845	0,0129
$^{95}_{401}$Zr+$^{95m}_{41}$Nb	64,02 сут	27,0	4,12
$^{95}_{41}$Nb	35,01 сут	28,0	4,27
$^{110m}_{47}$Ag+$^{110}_{47}$Ag	249,9 сут	101,0	15,4
$^{131}_{53}$I	8,054 сут	14,1	2,16
$^{134}_{55}$Cs	2,062 года	57,1	8,72
$^{137}_{55}$Cs+$^{137m}_{55}$Ba	30,18 года	21,2	3,24
$^{170}_{69}$Tm	128,6 сут	0,174	0,0266
$^{192}_{77}$Ir	74,08 сут	30,1	4,60
$^{198}_{79}$Au	2,695 сут	15,1	2,30
$^{203}_{80}$Hg	46,73 сут	8,45	1,29
$^{226}_{88}$Ra[*1*]	1600 лет	59,1	9,03
$^{226}_{88}$Ra[*2]	1600 лет	55,0	8,4

[*1] $^{226}_{88}$Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада до RaD без фильтра.

[*2] $^{226}_{88}$Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада до RaD после начального платинового фильтра толщиной 0,5 мм.

Таблица 56

Сечения выведения различных элементов и веществ для нейтронов спектра деления

Элемент или соединения	Сечение выведения, *барн*	Элемент или соединение	Сечение выведения, *барн*
H	1,00	Fe	1,98
D_2	0,88	Co	2,02
Li	1,01	Ni	1,89
Be	1,07	Cu	2,04
B	0,97	Zn	2,12
C	0,81	Zr	2,36
O_2	1,07	Mo	2,38
Na	1,26	Cd	2,73
Mg	1,29	Ba	3,33
Al	1,31	W	2,51
Si	1,20	Pb	3,53
K	1,5	Bi	3,49
Ca	1,60	U	3,6
Ti	1,72	H_2 O	2,92
V	1,77	$(CH_2)n$	2,84
Cr	1,77	D_2 O	2,76
Mn	1,79		

Таблица 57

Длина релаксации плотности потока нейтронов с энергией большей 2 МэВ и значения f для плотности потока нейтронов с энергией большей 1,5 МэВ при прохождении нейтронов источника сс энергией E_0 через различные среды

Среда	E_0 = 4МэВ			E_0 = 14÷15 МэВ		
	d, г/см^2	L, г/см^2	f	*d*, г/см^2	L, г/см^2	f
Вода	90	6,2 [*1]	5,4	120	14,2[*1]	3,0
Углерод	118	19	1,4	118	32,9	1,3
Карбид бора	200	20	5,0	280	28,8	1,8
Полиэтилен	60	5,05	2;4	69	12,8	2,5
Плексиглас	70	7,32	2,1	85	17,7	2,1
Железо	350	59,5	4,9	430	64,2	2,7
Свинец	565	169	4,0	620	173	2,9

Таблица 58

Длина релаксации λ точечных изотропных моноэнергетических источников для различных материалов (бесконечная геометрия), г/см²

Материал	Удельный вес	Энергия нейтронов источника, МэВ	X, г/см²	λ	
				$D_{б.н}$ (E > 0,33 МэВ)	$Ф_{б.н}$ (E > 2 МэВ)
Алюминий	2,7	4,0	135	–	38,1
		14,9	135	–	42,6
Вода	1,0	2	60	4,5	–
		4	90	6,2	–
		6	120	9,3	–
		8	120	11,2	–
		10	120	12,6	–
		14	120	14,2	–
Графит	1,6	4,0	118	–	19
		14,9	185	–	32,9
Железо	7,8	4,0	350	–	59,2
		14,9	430	106*	64,2
Полиэтилен		4,0	60	–	5,05
		14,9	69	–	12,80
Свинец	11,34	4,0	564	–	169
		14,9	620	–	173

* Для нейтронов с энергией E > 0,5 МэВ.

Таблица 59

Дозовые характеристики моноэнергетического γ-излучения

Энергия фотонов E_γ, Мэв	Удельная d, Зв-м²/фотон	Флюенс Ф,фотон/м², создающий $ПДД_А = 5 \cdot 10^{-2}$ Зв	Фу $ДПП_А$, фотон/(м² · с)	Коэффициент изотропности J
$2 \cdot 10^{-2}$	$1{,}8 \cdot 10^{-16}$	$3{,}1 \cdot 10^{14}$	$43 \cdot 10^{6}$	2
$3 \cdot 10^{-2}$	$7{,}2 \cdot 10^{-17}$	$6{,}9 \cdot 10^{14}$	$96 \cdot 10^{6}$	2
$5 \cdot 10^{-2}$	$3{,}1 \cdot 10^{-17}$	$1{,}6 \cdot 10^{16}$	$22 \cdot 10^{7}$	2
$1 \cdot 10^{-1}$	$3{,}9 \cdot 10^{-17}$	$1{,}3 \cdot 10^{15}$	$18 \cdot 10^{7}$	1,8
$2 \cdot 10^{-1}$	$9{,}8 \cdot 10^{-17}$	$5{,}1 \cdot 10^{14}$	$71 \cdot 10^{6}$	1,7
$5 \cdot 10^{-1}$	$2{,}5 \cdot 10^{-16}$	$2{,}0 \cdot 10^{14}$	$28 \cdot 10^{6}$	1,6
1	$4{,}8 \cdot 10^{-16}$	$1{,}0 \cdot 10^{14}$	$14 \cdot 10^{6}$	1,4
2	$8{,}3 \cdot 10^{-16}$	$6{,}0 \cdot 10^{18}$	$83 \cdot 10^{5}$	1,3
5	$1{,}6 \cdot 10^{-15}$	$3{,}1 \cdot 10^{13}$	$43 \cdot 10^{5}$	1,2
10	$2{,}9 \cdot 10^{-15}$	$1{,}8 \cdot 10^{13}$	$24 \cdot 10^{5}$	1,2
20	$4{,}3 \cdot 10^{-15}$	$1{,}2 \cdot 10^{13}$	$16 \cdot 10^{5}$	1,2

Таблица 60

Дозовые характеристики моноэнергетических нейтронов

Энергия нейтронов E_n, МэВ	Удельная d, 10^{-15} Зв-м^2/ нейтр.	Флюенс Ф, 10^{13} нейтр./м^2, создающий $H_{ПДД_A} = 5 \cdot 10^{-2}$ Зв	$\varphi_{ДППА}$ 10^4 нейтр./(м$^2 \cdot$ с)	Коэффициент качества к	Коэффициент изотропности J
Тепловые	0,91	5,0	770	2,8	6
$1 \cdot 10^{-7}$	0,91	5,0	770	2,8	6
$1 \cdot 10^{-6}$	2,1	2,4	330	2,8	5
$1 \cdot 10^{-4}$	1,1	2,4	330	2,8	5
$5 \cdot 10^{-3}$	1,6	3,1	430	2,5	6
$2 \cdot 10^{-2}$	1,7	2,9	400	2,7	5
$12 \cdot 10^{-2}$	8,2	0,61	84	9,0	3
$5 \cdot 10^{-1}$	0,26	0,19	27	12	2,2
1	0,37	0,13	19	12	2,2
2,5	0,43	0,12	16	10	1,5
5	0,43	0,12	16	8,4	1,6
10	0,50	0,10	14	6,7	1,7
20	0,63	0,079	11	8,0	2,5

Таблица 61

Сечения радиационного захвата тепловых нейтронов, имеющих энергию 0,0253 эВ (для естественной смеси радионуклидов)

Элемент или вещество	Относительная атомная или молекулярная масса	Плотность, г/см^3	Количество ядер в 1 см^3, 10^{24}	σ (п, γ), барн	$\Sigma_{n,\gamma}$, см$^{-1}$
H	1,008	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,335	$1,7 \cdot 10^{-5}$
H_2O	18,016	1,00	0,0335	0,66	0,022
$[CH_2]_n$	14,027	0,92	0,0395	0,675	0,0266
Li*	6,940	0,534	0,0463	0,0021	$9,75 \cdot 10^{-5}$
Be	9,013	1,85	0,1236	0,01	0,00123
BeO	25,02	3,025	0,0728	0,01	0,00073
B**	10,82	2,45	0,1364	755	102,98
C	12,011	1,60	0,0803	0,0032	0,00026
B_4C	55,291	1,30	0,0141	3020	42,58
Na	22,991	0,971	0,0254	0,505	0,013
Mg	24,32	1,74	0,0431	0,063	0,00271

Окончание табл. 61

Элемент или вещество	Относительная атомная или молекулярная масса	Плотность, г/см^3	Количество ядер в 1 см^3, 10^{24}	σ (n, γ), барн	$\Sigma_{n,\gamma}$, см$^{-1}$
Al	26,98	2,699	0,0602	0,230	0,014
Si	28,09	2,42	0,0522	0,13	0,007
S	32,066	2,07	0,0389	0,49	0,019
K	39,100	0,87	0,0134	1,97	0,026
Ca	40,08	1,55	0,0233	0,43	0,010
Ti	47,90	4,5	0,0566	5,8	0,328
Cr	52,01	7,1	0,0822	3,1	0,238
Mn	54,94	7,2	0,0789	13,2	1,04
Fe	55,85	7,85	0,0848	2,53	0,215
Чугун	55,855	7,2	0,0775	2,53	0,196
Х18Н10Т	–	7,8	–	–	0,2417
Co	58,94	8,9	0,0910	36,3	3,37
Ni	58,71	8,9	0,0913	4,6	0,42
Zr	91,22	6,4	0,0423	$1{,}85 \cdot 10^{-4}$	0,008
Mo	95,95	10,2	0,0640	2,50	0,160
Cd	112,41	8,65	0,0464	2550	118
W	183,86	19,3	0,0632	19,2	1,21
Pb	207,21	11,35	0,0330	0,17	0,006
Bi	209,00	9,747	0,0281	0,032	0,001
U	238,07	18,9	0,04783	7,68	0,364
UO_2	270,07	10,0	0,0223	7,68	0,171
U^{238}	238	18,7	0,0473	2,75	0,130

* Li^7По реакции Li^6 (n, γ) Li^7.
** С учетом реакции B^{10} (n, α) Li^7.

Таблица 62

Интегральный секанс $F(\theta, \mu x) = \int_0^{\theta} e^{-\mu\delta \sec\theta}\, d\theta$

θ^0	μδ					
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,04,0	5,0
2	$2{,}117 \cdot 10^{-2}$	$1{,}28 \cdot 10^{-2}$	$4{,}720 \cdot 10^{-3}$	$1{,}736 \cdot 10^{-3}$	$6{,}387 \cdot 10^{-3}$	$2{,}338 \cdot 10^{-4}$
4	4,232	2,565	9,429	3,465	$1{,}274 \cdot 10^{-3}$	4,659
6	6,345	3,844	$1{,}412 \cdot 10^{-2}$	5,182	1, 900	6,962
8	8,453	5,118	1,877	6,879	2,520	9,231
10	$1{,}056 \cdot 10^{-1}$	6,385	2,337	8,552	3,127	$1{,}143 \cdot 10^{-3}$
12	1,265	7,646	2,792	$1{,}019 \cdot 10^{-2}$	3,720	1,356

Продолжение табл. 62

θ^0	$\mu\delta$					
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,04,0	5,0
14	1,474	8,896	3,240	1,180	4,296	1,562
16	1,682	$1{,}014 \cdot 10^{-1}$	3,680	1,336	4,85l	1,759
18	1,889	1,136	4,111	1,487	5,384	1,946
20	2,095	1,257	4,531	1,633	5,891	2,122
22	2,299	1,377	4,941	1,773	6,373	2,286
24	2,502	1,495	5,338	1,907	6,825	2,438
26	2,703	1,610	5,722	2,035	7,247	2,577
28	2,902	1,724	6,092	2,155	7,640	2,705
30	3,099	1,835	6,447	2,268	8,001	2,820
32	3,294	1,944	6,785	2,373	8,363	2,923
34	3,486	2,050	7,107	2,471	8,658	3,014
36	3,676	2,153	7,410	2,560	8,922	3,092
38	3,862	2,252	7,695	2,638	9,154	3,160
40	4,046	2,349	7,961	2,712	9,356	3,218
42	4,226	2,441	8,206	2,777	9,531	3,265
44	4,402	2,530	8,432	2,835	9,677	3,303
46	4,574	2,615	8,639	2,885	9,799	3,333
48	4,741	2,296	8,826	2,928	9,900	3,356
50	4,904	2,772	8,892	2,964	9,977	3,373
52	5,062	2,843	9,138	2,993	$1{,}004 \cdot 10^{-2}$	3,385
54	5,214	2,909	9,263	3,018	1,008	3,394
56	5,360	2,970	9,372	3,037	1,012	3,398
58	5,499	3,026	9,461	3,051	1,014	3,399
60	5,631	3,076	9,533	3,061	1,015	3,399
62	5,755	3,120	9,589	3,069	1,016	3,399
64	5,871	3,159	9,632	3,074	1,017	3,399
66	5,978	3,192	9,663	3,077	1,017	3,399
68	6,075	3,219	9,684	3,078	1,017	3,399
70	5,161	3,240	9,698	3,079	1,017	3,399
72	6,236	3,256	9,706	3,079	1,017	3,399
74	6,299	3,268	9,709	3,080	1,017	3,399
76	6,350	3,275	9,710	3,080	1,017	5,399
78	6,388	3,279	9,711	3,080	1,017	3,399
80	6,413	3,281	9,711	3,080	1,017	3,399
82	6,428	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
84	6,434	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
86	6,436	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
88	6,436	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
90	6,436	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399

Окончание табл. 62

θ^0	$\mu\delta$						
	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0
2	$8{,}725 \cdot 10^{-8}$	$3{,}141 \cdot 10^{-5}$	$1{,}163 \cdot 10^{-6}$	$4{,}296 \cdot 10^{-6}$	$1{,}579 \cdot 10^{-6}$	$2{,}136 \cdot 10^{-7}$	$2{,}89 \cdot 10^{-8}$
4	$1{,}727 \cdot 10^{-4}$	6,282	2,324	8,545	3,140	4,240	5,732
6	2,565	9,423	3,458	$1{,}270 \cdot 10^{-5}$	4,662	6,284	8,477
8	3,385	$1{,}256 \cdot 10^{-4}$	4,559	1,672	6,129	8,241	$1{,}108 \cdot 10^{-7}$
10	4,188	1,553	5,618	2,057	7,527	$1{,}007 \cdot 10^{-6}$	1,352
12	4,973	1,832	6,625	2,420	8,839	1,176	1,575
14	5,724	2,094	7,572	2,760	$1{,}006 \cdot 10^{-5}$	1,332	1,776
16	6,422	2,338	8,458	3,073	1,117	1,472	1,953
18	7,067	2,565	9,271	3,359	1,217	1,596	2,106
20	7,678	2,774	$1{,}001 \cdot 10^{-4}$	3,615	1,306	1,704	2,235
22	8,236	2,966	1,068	3,842	1,384	1,795	2,343
24	8,742	3,123	1,126	4,040	1,451	1,871	2,426
26	9,214	3,281	1,177	4,209	1,507	1,934	2,490
28	9,632	3,420	1,221	4,352	1,554	1,983	2,543
30	9,999	3,542	1,260	4,471	1,592	2,022	2,582
32	$1{,}031 \cdot 10^{-3}$	3,630	1,293	4,567	1,622	2,051	2,611
34	1,057	3,717	1,318	4,645	1,645	2,073	2,630
36	1,080	3,787	1,339	4,707	1,663	2,088	2,644
38	1,099	3,839	1,355	4,753	1,676	2,098	2,653
40	1,115	3,874	1,368	4,786	1,685	2,159	2,659
42	1,127	3,907	1,376	4,809	1,691	2,203	2,662
44	1,136	3,931	1,383	4,825	1,695	2,230	2,664
46	1,143	3,949	1,387	4,836	1,698	2,246	2,665
48	1,148	3,962	1,390	4,843	1,699	2,254	2,665
50	1,152	3,970	1,392	4,846	1,700	2,258	2,665
52	1,154	3,975	1,393	4,849	1,701	2,261	2,665
54	1,156	3,978	1,394	4,850	1,701	2,261	2,665
56	1,157	3,980	1,394	4,850	1,701	2,262	2,665
58	1,158	3,981	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
60	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
62	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
64	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
66	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
68	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
70	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
72	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
74	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
76	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
78	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
80	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
82	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
84	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
86	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
88	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
90	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665

Таблица 63

Константы A_1, α_1 и α_2 для представления дозового фактора накопления в экспоненциальной форме для точечного изотропного источника в бесконечной среде

$$B_{\infty}^{D} = A_1 e^{-\alpha_1 \mu x} - (1 - A_1) e^{-\alpha_2 \mu x}$$

Материал	Eγ, МеВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2
Вода	0,5	24,0	0,138	0,0
	1,0	11,0	0,104	0,030
	2,0	6,4	0,076	0,092
	3,0	5,2	0,062	0,108
	4,0	4,5	0,056	0,117
	6,0	3,6	0,050	0,124
	8,0	3,0	0,045	0,128
	10,0	2,7	0,042	0,130
Алюминий	1,0	8,0	0,11	0,044
	2,0	5,5	0,082	0,092
	3,0	4,5	0,074	0,116
	4,0	3,8	0,066	0,130
	6,0	3,1	0,064	0,152
	8,0	2,3	0,062	0,150
	10,0	2,25	0,060	0,128
Железо	0,5	10,0	0,0948	0,012
	1,0	8,0	0,0895	0,04
	2,0	5,5	0,0788	0,07
	3,0	5,0	0,074	0,075
	4,0	3,75	0,075	0,082
	6,0	2,9	0,082	0,075
	8,0	2,35	0,083	0,055
	10,0	2,0	0,095	0,012
Свинец	0,5	1,65	0,032	0,291
	1,0	2,45	0,045	0,171
	2,0	2,60	0,071	0,103
	3,0	2,15	0,097	0,077
	4,0	1,65	0,123	0,064
	5,11	1,20	0,152	0,059
	6,0	0,96	0,175	0,059
	8,0	0,67	0,204	0,067
	10,0	0,50	0,214	0,08

Окончание табл. 63

Материал	Eγ, МеВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2
Бетон (ρ = 2,35 г/см^3)	0,5	104,0646	0,06391	–0,04423
	0,6	101,6332	0,05752	–0,03888
	0,8	110,2822	0,04654	–0,03200
	1,0	101,4567	0,3845	–0,02457
	1,5	32,8117	0,03522	–0,00174
	2,0	39,3072	0,02468	–0,00162
	3,0	13,7579	0,02849	0,02761
	4,0	14,2241	0,02223	0,02316
	5,0	9,2680	0,02666	0,03280
	6,0	8,8694	0,02358	0,03132
	8,0	7,0033	0,02304	0,03323
	10,0	5,3187	0,02652	0,03799
	15,0	4,7588	0,02340	0,02849

Таблица 64

Массовый μ_m и линейный μ коэффициенты ослабления и длина свободного пробега l для различных материалов в зависимости от анергии фотонного излучения

E_γ, МэВ	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см
	Вода, ρ = 1,0 г/см^3			Воздух, $\rho = 1{,}2928 \cdot 10^{-3}$ г/см^3		
0,01	4,99	4,99	0,200	4,81	6,22	0,161
0,015	1,50	1,50	0,667	1,45	1,87	0,535
0,02	0,707	0,707	1,41	0,678	0,876	1,14
0,03	0,325	0,325	3,08	0,304	0,393	2,54
0,04	0,238	0,238	4,20	0,219	0,283	3,53
0,05	0,207	0,207	4,83	0,188	0,243	4,12
0,06	0,192	0,192	5,21	0,173	0,224	4,46
0,08	0,175	0,175	5,71	0,158	0,204	4,90
0,1	0,165	0,165	6,06	0,149	0,193	5,18
0,145	0,150	0,150	6,67	0,135	0,174	5,75
0,15	0,148	0,148	6,76	0,133	0,172	5,81
0,2	0,136	0,136	7,35	0,122	0,158	6,33
0,279	0,121	0,121	8,26	0,109	0,141	7,09
0,3	0,118	0,118	8,47	0,106	0,137	7,30
0,4	0,106	0,106	9,43	0,0952	0,123	8,13
0,412	0,105	0,105	9,52	0,0940	0,122	8,20
0,5	0,0966	0,0966	10,4	0,0869	0,112	8,93
0,6	0,0894	0,0894	11,2	0,0804	0,104	9,62
0,662	0,0857	0,0857	11,7	0,0770	0,0995	10,0
0,8	0,0786	0,0786	12,7	0,0707	0,0914	10,9

Продолжение табл. 64

E_γ, МэВ	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см
	Вода, ρ = 1,0 г/см^3			Воздух, $\rho = 1{,}2928 \cdot 10^{-3}$ г/см^3		
1,0	0,0706	0,0706	14,2	0,0635	0,0821	12,2
1,25	0,0631	0,0631	15,8	0,0568	0,0734	13,6
1,5	0,0575	0,0575	17,4	0,0517	0,0668	15,0
2,0	0,0494	0,0494	20,2	0,0444	0,0574	17,4
2,75	0,0410	0,0410	24,4	0,0365	0,0472	21,2
3,0	0,0397	0,0397	25,2	0,0358	0,0463	21,6
4,0	0,0340	0,0340	29,4	0,0308	0,0398	25,1
5,0	0,0021303	0,0303	33,0	0,0275	0,0356	28,1
6,0	0,0277	0,0277	36,1	0,0252	0,0326	30,7
8,0	0,0243	0,0243	41,2	0,0223	0,0288	34,7
10,0	0,0222	0,0222	45,0	0,0204	0,0264	37,9
E_γ, МэВ	$(\mu)_m$, см^2/г	μ, см$^{-1}$	l, см	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см
	Алюминий, ρ = 2,70 г/см^3			Бетон, ρ = 2,8 г/см^3		
0,01	25,9	69,9	0,0143	26,2	60,3	0,0166
0,015	7,48	20,2	0,0495	7,98	18,4	0,0542
0,02	3,19	8,61	0,116	3,42	7,87	0,127
0,03	1,00	2,70	0,370	1,08	2,48	0,403
0,04	0,493	1,33	0,752	0,531	1,22	0,820
0,05	0,319	0,861	1,16	0,341	0,784	1,28
0,06	0,243	0,656	1,52	0,259	0,596	1,68
0,08	0,181	0,489	2,04	0,192	0,442	2,26
0,1	0,157	0,424	2,36	0,166	0,382	2,62
0,145	0,134	0,362	2,76	0,139	0,320	3,12
0,15	0,132	0,356	2,81	0,138	0,317	3,15
E_γ, МэВ	$(\mu)_m$, см^2/г	μ, см$^{-1}$	l, см	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см
	Алюминий, ρ = 2,70 г/см^3			Бетон, ρ = 2,8 г/см^3		
0,2	0,119	0,321	3,12	0,124	0,285	3,51
0,279	0,106	0,286	3,50	0,110	0,253	3,95
0,3	0,103	0,278	3,60	0,107	0,246	4,06
0,4	0,0917	0,248	4,03	0,0954	0,219	4,57
0,412	0,0907	0,245	4,08	0,0940	0,216	4,63
0,5	0,0839	0,226	4,42	0,0871	0,200	5,00
0,6	0,0774	0,209	4,78	0,0806	0,185	5,41
0,662	0,0743	0,201	4,98	0,0771	0,177	5,65
0,8	0,0681	0,184	5,43	0,0707	0,163	6,13
1,0	0,0612	0,165	6,06	0,0636	0,146	6,80
1,25	0,0550	0,148	6,76	0,0568	0,131	7,63
1,5	0,0500	0,135	7,41	0,0518	0,119	8,40
2,0	0,0431	0,116	8,62	0,0447	0,103	9,71

Окончание табл. 64

E_γ, МэВ	$(\mu)_m$, см^2/г	μ, см$^{-1}$	l, см	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см
	Алюминий, ρ = 2,70 г/см^3			Бетон, ρ = 2,8 г/см^3		
2,75	0,0368	0,0994	0,1	0,0380	0,0874	11,4
3,0	0,0355	0,0958	10,4	0,0364	0,0837	11,9
4,0	0,0310	0,0837	11,9	0,0319	0,0734	13,6
5,0	0,0283	0,0764	13,1	0,0289	0,0665	15,0
6,0	0,0266	0,0718	13,9	0,0269	0,0619	16,2
8,0	0,0243	0,0656	15,2	0,0244	0,0561	17,8
10,0	0,0232	0,0626	16,0	0,0230	0,0529	18,9
E_γ, МэВ	$(\mu)_m$, см^2/г	μ, см$^{-1}$	l, см	$(\mu)_m$, см^2 /г	μ, см$^{-1}$	l, см
	Железо, ps = 7,86 г/см'			Свинец, p = 11,34 г/см'		
0,01	169	1330	0,0008	123	1390	0,0007
0,015	56,0	440	0,0023	107	1210	0,0008
0,02	25,0	196	0,0051	82,8	939	0,0011
0,03	7,80	61,3	0,0163	28,5	323	0,0031
0,04	3,41	26,8	0,0373	13,3	151	0,0066
0,05	1,81	14,2	0,0704	7,24	82,1	0,0122
0,06	1,11	8,72	0,115	4,48	50,8	0,0197
0,08	0,537	4,22	0,237	2,08	23,6	0,0424
0,1	0,331	2,60	0,385	5,32	60,3	0,0166
0,145	0,192	1,51	0,662	2,17	24,6	0,0406
0,15	0,177	1,39	0,719	1,92	21,8	0,0459
0,2	0,135	1,06	0,943	0,942	10,7	0,0934
0,279	0,110	0,865	1,16	0,410	4,65	0,215
0,3	0,106	0,833	1,20	0,375	4,25	0,235
0,4	0,0912	0,717	1,39	0,215	2,44	0,410
0,412	0,0900	0,707	1,41	0,205	2,32	0,431
0,5	0,822	0,646	1,55	0,150	1,70	0,588
0,6	0,0757	0,595	1,68	0,117	1,33	0,752
0,662	0,0725	0,570	1,75	0,104	1,18	0,847
0,8	0,0662	0,520	1,92	0,0840	0,952	1,05
1,0	0,0594	0,467	2,14	0,0680	0,771	1,30
1,25	0,0537	0,422	2,37	0,0580	0,658	1,52
1,5	0,0485	0,381	2,62	0,0509	0,577	1,73
2,0	0,0424	0,333	3,00	0,0448	0,508	1,97
2,75	0,0370	0,291	3,44	0,0420	0,476	2,10
3,0	0,0361	0,284	3,52	0,0413	0,468	2,14
4,0	0,0331	0,260	3,85	0,0416	0,472	2,12
5,0	0,0315	0,248	4,03	0,0424	0,481	2,08
6,0	0,0305	0,240	4,17	0,0436	0,494	2,02
8,0	0,0298	0,234	4,27	0,0459	0,520	1,92
10,0	0,0298	0,234	4,27	0,0485	0,550	1,82

Таблица 65

Дозовые факторы накопления для точечного изотропного источника в бесконечной среде $B_{\infty}^{D}(E_{\gamma}, Z, \mu x)$

E_{γ}, МэВ	μx						
	1	2	4	7	10	15	20
Алюминий							
0,5	2,37	4,24	9,47	21,5	38,9	80,8	141
0,662	2,18	3,85	8,16	17,3	30,0	66,4	104
1,6	2,02	3,31	6,57	13,1	21,2	37,9	58,5
1,25	1,92	3,06	5,90	11,3	17,4	29,8	45,5
2,0	1,75	2,61	4,62	8,05	11,9	18,7	26,3
2,75	1,66	2,39	3,92	6,50	9,30	12,1	19,5
3,0	1,64	2,32	3,78	6,14	8,65	13,0	17,7
4,0	1,53	2,08	3,22	5,01	6,88	10,1	13,4
6,0	1,42	1,85	2,70	4,06	5,49	7,97	10,4
8,0	1,34	1,68	2,37	3,45	4,58	6,56	8,52
10,0	1,28	1,55	2,12	3,01	3,96	5,63	7,32
Свинец							
0,5	1,24	1,42	1,69	2,0	2,27	2,65	2,73
0,662	1,33	1,56	1,92	2,42	2,88	3,42	4,00
1,0	1,37	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
1,25	1,38	1,72	2,41	3,27	4,12	5,40	7,40
2,0	1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00
2,75	1,36	1,72	2,46	3,75	5,72	8,00	9,22
3,0	1,34	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
4,6	1,27	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
6,6	1,18	1,40	1,97	3,34	5,69	13,8	32,7
8,0	1,149	1,30	1,74	2,89	5,07	14,1	44,6
10,0	1,11	1,23	1,58	2,52	4,34	12,5	39,2

E_{γ}, МэВ	μx									
	0,5	1	2	4	7	10	15	20	30	40
Воздух										
0,50	1,60	2,44	4,84	12,66	31,6	60,6	134	241	567	1050
0,60	1,56	2,33	4,46	10,9	26,0	47,9	100	173	379	665
0,80	1,50	2,17	3,94	8,88	19,4	33,5	64,9	105	210	345
1,00	1,47	2,08	3,60	7,60	15,6	25,й	47,0	72,8	136	212
1,50	1,42	1,92	3,08	5,86	10,8	16,7	27,7	40,2	68,5	100
2,00	1,38	1,83	2,81	4,96	8,61	12,6	20,0	27,9	45,0	63,2
3,00	1,34	1,71	2,46	4,00	6,43	8,97	13,4	17,9	27,2	36,7
4,00	1,31	1,63	2,25	3,46	5,3l	7,19	10,3	13,5	19,9	26,3
5,00	1,29	1,57	2,09	3,11	4,62	6,13	8,63	11,1	16,1	21,0
6,00	1,27	1,52	1,97	2,85	4,14	5,42	7,51	9,58	13,6	16,9

Продолжение табл. 65

E_γ, МэВ	μx									
	0,5	1	2	4	7	10	15	20	30	40
8,00	1,23	1,43	1,80	2,50	3,51	4,49	6,08	7,64	10,7	14,1
10,00	1,20	1,37	1,68	2,26	3,10	3,92	5,25	6,55	9,11	11,6
15,00	1,15	1,28	1,49	1,90	2,50	3,08	4,03	4,96	6,75	8,31
Вода										
0,30	1,75	2,85	6,30	19,3	57,8	126	327	676	1990	4410
0,40	1,66	2,61	5,44	15,3	41,9	85,0	202	387	999	1990
0,50	1,60	2,44	4,88	12,8	32,7	62,9	139	252	594	1110
0,60	1,56	2,33	4,49	11,2	26,7	49,3	104	179	395	695
0,80	1,50	2,17	3,96	9,00	19,8	34,2	66,3	108	215	353
1,00	1,47	2,08	3,62	7,68	15,8	26,1	47,7	74,0	139	218
1,50	1,41	1,92	3,10	5,88	10,9	16,7	27,8	40,4	68,7	101
2,00	1,38	1,83	2,81	4,98	8,65	12,7	20,1	28,0	45,2	63,7
3,00	1,34	1,71	2,46	4,00	6,43	8,97	13,3	17,8	27,1	36,5
4,00	1,31	1,63	2,24	3,46	5,30	7,16	10,3	13,4	19,7	25,9
5,00	1,28	1,56	2,08	3,08	4,58	6,05	8,49	10,9	15,7	20,4
6,00	1,27	1,51	1,97	2,84	4,12	5,37	7,41	9,42	13,3	16,4
8,00	1,23	1,43	1,80	2,49	3,48	4,44	5,99	7,49	10,4	13,4
10,00	1,20	1,37	1,68	2,25	3,07	3,86	5,14	6,38	8,78	11,2
15,00	1,15	1,28	1,49	1,90	2,49	3,05	3,96	4,84	6,51	7,91
Бетон обычный										
0,1	1,89	2,78	4,63	8,80	16,3	25,6	44,9	69,1	131	214
0,15	1,84	2,82	5,13	11,2	24,2	42,7	87,6	153	353	664
0,2	1,78	2,72	5,05	11,6	26,7	49,6	109	201	507	1020
0,3	1,68	2,32	4,66	10,8	25,6	48,2	107	198	497	985
0,4	1,61	2,37	4,31	9,8	22,8	42,1	90,7	162	383	719
0,5	1,57	2,27	4,03	8,9	20,2	36,4	75,6	131	292	523
0,6	1,53	2,18	3,80	8,2	18,0	31,8	63,6	107	226	389
0,8	1,48	2,06	3,47	7,1	14,9	25,1	47,4	75,7	149	242
1,0	1,45	1,98	3,24	6,4	12,7	20,7	37,2	57,1	106	164
1,5	1,39	1,85	2,86	5,2	9,58	14,6	24,2	35,0	59,6	87,1
2,0	1,37	1,77	2,65	4,6	7,97	11,7	18,6	26,0	42,2	59,8
3,0	1,33	1,67	2,38	3,84	6,20	8,71	13,1	17,7	27,4	37,4
4,0	1,31	1,61	2,18	3,37	5,23	7,15	10,5	13,9	20,9	28,4
5,0	1,27	1,53	2,04	3,03	4,57	6,15	8,85	11,6	17,3	24,8
6,0	1,26	1,49	1,93	2,80	4,14	5,52	7,86	10,2	15,2	20,5

Окончание табл. 65

E_γ, МэВ	Бетон обычный									
	μx									
	0,5	1	2	4	*7*	10	15	20	30	40
8,0	1,22	1,41	1,76	2,45	3,51	4,59	6,43	8,31	12,2	16,2
10,0	1,19	1,35	1,64	2,22	3,10	4,01	5,57	7,19	10,6	14,5
15,0	1,15	1,26	1,46	1,86	2,50	3,16	4,34	5,59	8,2	10,9
Железо										
0,50	1,48	1,99	3,12	5,96	11,7	19,1	35,1	55,4	108	177
0,60	1,46	1,96	3,07	5,90	11,6	19,0	34,8	54,8	107	173
0,80	1,43	1,90	2,96	5,62	10,9	17,5	31,4	48,5	91,0	144
1,00	1,41	1,85	2,85	5,30	10,0	15,8	27,5	41,3	74,5	114
1,50	1,37	1,76	2,62	4,65	8,30	12,5	20,6	29,7	50,4	73,8
2,00	1,35	1,71	2,49	4,25	7,33	10,8	17,4	24,6	40,9	59,1
3,00	1,32	1,64	2,28	3,68	6,09	8,80	13,8	19,4	31,7	45,5
4,00	1,30	1,57	2,12	3,29	5,31	7,60	11,9	16,8	27,9	40,6
5,00	1,27	1,51	1,97	2,98	4,73	6,75	10,7	15,2	25,9	38,8
6,00	1,25	1,47	1,87	2,76	4,33	6,18	9,85	14,2	25,1	38,8
8,00	1,22	1,39	1,71	2,41	3,71	5,30	8,64	12,9	24,5	40,9
10,0	1,19	1,33	1,59	2,16	3,27	4,09	7,88	12,3	25,7	47,6
15,0	1,14	1,24	1,41	1,80	2,61	3,77	6,80	11,8	32,8	82,8

Таблица 66

Массовый $(\mu_{en})_m$ и линейный μ_{en} коэффициенты поглощения энергии для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения

E_γ, МэВ	$(\mu_{en})_m$, $см^2/г$	μ_{en}, $см^{-1}$	$(\mu_{en})_m$, $см^2/г$	μ_{en}, $см^{-1}$
Вода, $\rho = 1{,}0$ г/см^3			Воздух, $\rho = 1{,}2928 \cdot 10^{-3}$ г/см^3	
0,01	4,84	4,84	4,65	6,01
0,015	1,34	1,34	1,30	1,68
0,02	0,536	0,536	0,527	0,681
0,03	0,152	0,152	0,150	0,194
0,04	0,0680	0,0680	0,0671	0,0867
0,05	0,0415	0,0415	0,0404	0,0522
0,06	0,0315	0,0315	0,0301	0,0889
0,08	0,0258	0,0258	0,0239	0,0309
0,1	0,0254	0,0254	0,0232	0,0300
0,145	0,0273	0,0273	0,0247	0,0319
0,15	0,0276	0,0276	0,0249	0,0322
0,2	0,0297	0,0297	0,0267	0,0345
0,279	0,0316	0,0316	0,0284	0,0367
0,3	0,0319	0,0319	0,0287	0,0371
0,4	0,0328	0,0328	0,0295	0,0381
0,412	0,0329	0,0329	0,0295	0,0381

Продолжение табл. 66

E_γ, МэВ	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$
Вода, $\rho = 1{,}0$ г/см^3			Воздух, $\rho = 1{,}2928 \cdot 10^{-3}$ г/см^3	
0,5	0,0330	0,0330	0,0297	0,0384
0,6	0,0328	0,0328	0,0295	0,0381
0,662	0,0326	0,0326	0,0294	0,0380
0,8	0,0320	0,0320	0,0288	0,0372
1,0	0,0310	0,0310	0,0279	0,0361
1,25	0,0296	0,0296	0,0266	0,0344
1,5	0,0283	0,0283	0,0254	0,0328
2,0	0,0260	0,0260	0,0234	0,0302
2,75	0,0235	0,0235	0,0212	0,0274
3,0	0,0228	0,0228	0,0206	0,0266
4,0	0,0206	0,0206	0,0187	0,0242
5,0	0,0192	0,0192	0,0174	0,0225
6,0	0,0180	0,0180	0,0165	0,0213
8,0	0,0166	0,0161	0,0152	0,0196
10,0	0,0156	0,0156	0,0144	0,0186
E_γ, МэВ	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$
Алюминий, $\rho = 2{,}70$ г/см^3			Бетон, $\rho = 2{,}3$ г/см^3	
0,01	25,4	68,6	25,1	57,7
0,015	7,32	19,8	7,65	17,6
0,02	3,06	8,26	3,21	7,38
0,03	0,857	2,31	0,910	2,09
0,04	0,353	0,953	0,384	0,883
0,05	0,181	0,489	0,198	0,455
0,06	0,108	0,292	0,117	0,269
0,08	0,0542	0,146	0,0591	0,126
0,1	0,0373	0,101	0,0407	0,0936
0,145	0,0281	0,0759	0,0301	0,0693
0,15	0,0277	0,0748	0,0298	0,0685
0,2	0,0272	0,0734	0,0286	0,0658
0,279	0,0279	0,0753	0,0291	0,0669
0,3	0,0281	0,0759	0,0293	0,0674
0,4	0,0286	0,0772	0,0298	0,0685
0,412	0,0286	0,0772	0,0298	0,0685
0,5	0,0290	0,0783	0,0299	0,0688
0,6	0,0283	0,0764	0,0296	0,0681
0,662	0,0281	0,0759	0,0293	0,0674
0,8	0,0277	0,0748	0,0287	0,0660
1,0	0,0268	0,0724	0,0278	0,0639
1,25	0,0255	0,0688	0,0266	0,0612
1,5	0,0243	0,0656	0,0254	0,0584
1,25	0,0255	0,0688	0,0266	0,0612
1,5	0,0243	0,0656	0,0254	0,0584

Окончание табл. 66

E_γ, МэВ	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$
Алюминий, ρ = 2,70 г/см^3			Бетон, ρ = 2,3 г/см^3	
2,0	0,0225	0,0608	0,0236	0,0543
2,75	0,0206	0,0556	0,0211	0,0485
3,0	0,0202	0,0545	0,0208	0,0478
4,0	0,0188	0,0508	0,0194	0,0446
5,0	0,0180	0,0486	0,0183	0,0421
6,0	0,0175	0,0472	0,0177	0,0407
8,0	0,0170	0,0459	0,0170	0,0391
10,0	0,0168	0,0454	0,0166	0,0382
E_γ, МэВ	$(\mu_{en})_m$,см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$	$(\mu_{en})_m$, см^2/г	μ_{en}, см$^{-1}$
Железо, ρ = 7,86 г/см^3			Свинец, ρ = 11,34 г/см^3	
0,01	138	1080	123	1390
0,015	49,2	387	88,4	1000
0,02	22,6	178	68,3	774
0,03	7,21	56,7	25,1	285
0,04	3,14	24,7	12,0	136
0,05	1,62	12,7	6,66	75,5
0,06	0,952	7,48	4,10	46,5
0,08	0,408	3,21	1,90	21,5
0,1	0,217	1,70	2,23	25,3
0,145	0,0850	0,668	1,22	13,8
1,15	0,0787	0,618	1,14	12,9
1,2	0,0479	0,376	0,625	7,09
1,279	0,0361	0,284	0,300	3,40
0,3,0	0,0335	0,263	0,259	2,94
0,4	0,0303	0,238	0,144	1,63
0,412	0,0301	0,236	0,137	1,55
0,5	0,0292	0,230	0,0956	1,08
0,6	0,0284	0,223	0,0715	0,811
0,662	0,0280	0,220	0,0645	0,731
0,8	0,0272	0,214	0,0485	0,550
1,0	0,0260	0,204	0,0378	0,429
1,25	0,0249	0,196	0,0320	0,363
1,5	0,0238	0,187	0,0276	0,313
2,0	0,0221	0,174	0,0244	0,277
2,75	0,0208	0,163	0,0237	0,269
3,0	0,0205	0,161	0,0236	0,268
4,0	0,0199	0,156	0,0248	0,281
5,0	0,0198	0,156	0,0264	0,299
6,0	0,0200	0,157	0,0276	0,313
8,0	0,0207	0,163	0,0299	0,339
10,0	0,0213	0,167	0,0317	0,359

Таблица 67

Характеристики изотопов, определяющие собственную активность теплоносителя

Материнский изотоп	Содержание изотопа в природной смеси, %	Реакция активация	Продукт активации	Период полураспада	Линия излучения	Энергия активационного излучения, Мэв	Выход излучения на распад
^{16}O	99,8	(n,p)	^{16}N	7,35 с	1	6,13 (γ)	0,76
					2	7,1 (γ)	0,06 (γ)
^{17}O	0,039	(n,p)	^{17}N	4,1 с		1 (n)	0,9 (n)
^{23}Na	100	(n, γ)	^{24}Na	15,4 ч	1	1,38 (γ)	1,0 (γ)
					2	2,76 (γ)	1,0 (γ)
^{23}Na	100	(n,2n)	^{22}Na	2,6 лет		1,26 (γ)	1,0 (γ)

Таблица 68

Характеристики изотопов, определяющие примесную активность теплоносителя реакторных установок

Материнский изотоп	Содержание в природной смеси, %	Реакция активация	Продукт активации	Период полураспада	Линия излучения	Энергия активационного излучения, Мэв	Выход излучения на распад
^{2}H	0,015	0,00057 (n,p)	^{3}H	12,26 лет		0,0186	1 (β)
^{6}Li	7,52	945 (n,α)	^{3}H	12,26 лет		0,0186	1 (β)
^{23}Na	100	0,53 (n,γ)	^{24}Na	15,1 ч	1	2,76	1 (γ)
					2	1,38	1 (γ)
^{37}Cl	24,5	0,56 (n,γ)	^{38}Cl	37,7 мин	1	1,6	0,31 (γ)
					2	2,15	0,47 (γ)
^{40}Ar	99,6	0,53 (n,γ)	^{41}Ar	1,86 ч		1,29	0,49 (γ)
^{41}K	6,91	1,15 (n,γ)	^{42}K	12,46 ч		1,52	0,18 (γ)

Табулированные функции

$$e^{-z}, E_i(x) \equiv -Ei(-x), \quad E_2 \equiv (x)$$

При расчетах защиты широко используются экспоненциальная и интегральная показательные функции:

$$e^{-z};\;\; E_n(x) = x^{n-1}\int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t^n}dt; \qquad E_i(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t}dt,$$

где n – целое положительное число. Некоторые полезные свойства этих функций:

$$\frac{dE_n(x)}{dx} = -E_{n-1}(x);\;\; E_n(x) = \int_x^\infty E_{n-1}(x')\,dx'.$$

Отсюда

$$E_n(x+\delta) = E_n(x) - \delta E_{n-1}(x) + \frac{\delta^2}{2!}E_{n-2}(x) - \ldots$$

$$E_n(x) = \frac{11}{n-1}\left[e^{-x} - E_{n-1}(x)\right]$$

При малых значениях *x* можно использовать следующее разложение

$$E_1(x) = \sum_{m=1}^{\infty}(-1)^{m+1}\frac{x^m}{m!m} - \ln x - c.$$

Здесь c = 0,577 – постоянная Эйлера.

При больших значениях *x* можно использовать асимптотическое разложение

$$E_1(x) \approx e^{-x}\left[\frac{1}{x} + \sum(-1)^m - \frac{m!}{x^{m+1}}\right],$$

$$E_1(x) \equiv -Ei(-x)$$

Отметим, что

а $E_2(x)$ также иногда называют функцией Кинга

$$E_2(x) \equiv A(x) = e^{-x} - x\left[-Ei(-x)\right]$$

Таблица 69

Экспоненциальная и интегральная показательные функции

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
0,0	1,000	∞	1,000
0,01	0,990	4,038	0,950
0,02	0,980	3,355	0,913
0,03	0,970	2,959	0,882
0,04	0,961	2,681	0,854
0,05	0,951	2,468	0,828
0,06	0,942	2,295	0,804
0,07	0,932	2,151	0,782
0,08	0,923	2,027	0,761

Продолжение табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
0,09	0,914	1,919	0,741
0,10	0,905	1,823	0,723
0,11	0,896	1,737	0,705
0,12	0,887	1,660	0,688
0,13	0,878	1,589	0,672
0,14	0,869	1,524	0,656
0,15	0,861	1,464	0,641
0,16	0,852	1,409	0,627
0,17	0,844	1,358	0,613
0,18	0,835	1,310	0,600
0,19	0,827	1,265	0,587
0,20	0,819	1,223	0,574
0,21	0,811	1,183	0,562
0,22	0,803	1,145	0,551
0,23	0,795	1,110	0,539
0,24	0,787	1,076	0,528
0,25	0,779	1,044	0,518
0,26	0,771	1,014	0,507
0,27	0,763	0,985	0,497
0,28	0,756	0,957	0,488
0,29	0,748	0,931	0,478
0,30	0,741	0,906	0,469
0,31	0,733	0,882	0,460
0,32	0,726	0,858	0,451
0,33	0,719	0,836	0,443
0,34	0,712	0,815	0,435
0,35	0,705	0,794	0,427
0,36	0,698	0,774	0,419
0,37	0,691	0,755	0,411
0,38	0,684	0,737	0,404
0,39	0,677	0,719	0,396
0,40	0,670	0,702	0,389
0,41	0,664	0,686	0,382
0,42	0,657	0,670	0,376
0,43	0,651	0,655	0,369
0,44	0,644	0,640	0,363
0,45	0,638	0,625	0,356
0,46	0,631	0,611	0,350
0,47	0,625	0,598	0,344
0,48	0,619	0,585	0,338

Продолжение табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
0,49	0,613	0,572	0,332
0,50	0,607	0,560	0,327
0,51	0,601	0,548	0,321
0,52	0,595	0,536	0,316
0,53	0,589	0,525	0,310
0,54	0,583	0,514	0,305
0,55	0,577	0,503	0,300
0,56	0,571	0,493	0,295
0,57	0,566	0,483	0,290
0,58	0,560	0,473	0,285
0,59	0,554	0,464	0,281
0,60	0,549	0,454	0,276
0,61	0,543	0,445	0,272
0,62	0,538	0,437	0,267
0,63	0,533	0,428	0,263
0,64	0,527	0,420	0,259
0,65	0,522	0,412	0,255
0,66	0,517	0,404	0,250
0,67	0,512	0,396	0,246
0,68	0,507	0,388	0,243
0,69	0,502	0,381	0,239
0,70	0,497	0,374	0,235
0,71	0,492	0,367	0,231
0,72	0,487	0,360	0,228
0,73	0,482	0,353	0,224
0,74	0,477	0,347	0,221
0,75	0,472	0,340	0,217
0,76	0,468	0,334	0,214
0,77	0,463	0,328	0,210
0,78	0,458	0,322	0,207
0,79	0,454	0,316	0,204
0,80	0,449	0,311	0,201
0,81	0,445	0,305	0,198
0,82	0,440	0,300	0,195
0,83	0,436	0,294	0,192
0,84	0,432	0,289	0,189
0,85	0,427	0,284	0,186
0,86	0,423	0,279	0,183
0,87	0,419	0,274	0,180
0,88	0,418	0,269	0,178

Продолжение табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
0,89	0,411	0,265	0,175
0,90	0,407	0,260	0,172
0,91	0,403	0,256	0,170
0,92	0,399	0,251	0,167
0,93	0,395	0,247	0,165
0,94	0,391	0,243	0,162
0,95	0,387	0,239	0,159
0,96	0,383	0,235	0,158
0,97	0,379	0,231	0,155
0,98	0,375	0,227	0,153
0,99	0,372	0,223	0,151
1,00	0,368	0,219	0,148
1,01	0,364	0,216	0,146
1,02	0,361	0,212	0,144
1,03	0,357	0,209	0,142
1,04	0,353	0,205	0,140
1,05	0,350	0,202	0,138
1,06	0,346	0,199	0,136
1,07	0,343	0,195	0,134
1,08	0,340	0,192	0,132
1,09	0,336	0,189	0,130
1,10	0,333	0,186	0,128
1,11	0,330	0,183	0,126
1,12	0,326	0,180	0,125
1,13	0,323	0,177	0,123
1,14	0,320	0,174	0,121
1,15	0,317	0,172	0,119
1,16	0,313	0,169	0,118
1,17	0,310	0,166	0,116
1,18	0,307	0,164	0,114
1,19	0,304	0,161	0,113
1,20	0,301	0,158	0,111
1,21	0,298	0,156	0,110
1,22	0,295	0,153	0,108
1,23	0,292	0,151	0,106
1,24	0,289	0,149	0,105
1,25	0,287	0,146	0,103
1,26	0,284	0,144	0,102
1,27	0,281	0,142	0,101
1,28	0,278	0,140	$9{,}92\cdot10^{-2}$

Продолжение табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
1,29	0,275	0,138	9,78
1,30	0,273	0,135	9,64
1,31	0,270	0,133	9,51
1,32	0,267	0,131	9,38
1,33	0,264	0,129	9,25
1,34	0,262	0,127	9,12
1,35	0,259	0,125	8,99
1,36	0,257	0,124	8,87
1,37	0,254	0,122	8,75
1,38	0,252	0,120	8,62
1,39	0,249	0,118	8,51
1,40	0,247	0,116	8,39
1,41	0,244	0,114	8,27
1,42	0,242	0,113	8,16
1,43	0,239	0,111	8,05
1,44	0,237	0,109	7,94
1,45	0,235	0,108	7,83
1,46	0,232	0,106	7,72
1,47	0,230	0,105	$7{,}62\cdot10^{-2}$
1,48	0,228	0,103	7,51
1,49	0,225	0,102	7,41
1,50	0,223	0,100	7,31
1,51	0,221	$9{,}85\cdot10^{-2}$	7,21
1,52	0,219	0,71	7,11
1,53	0,217	9,57	7,02
1,54	0,214	9,43	6,92
1,55	0,212	9,29	6,83
1,56	0,210	9,15	6,74
1,57	0,208	9,02	6,65
1,58	0,206	8,89	6,56
1,59	0,204	8,76	6,47
1,60	0,202	8,63	6,38
1,61	0,200	8,51	6,29
1,62	0,198	8,38	6,21
1,63	0,196	8,26	6,13
1,64	0,194	8,14	6,04
1,65	0,192	8,02	5,96
1,66	0,190	7,91	5,88
1,67	0,188	7,80	5,81
1,68	0,186	7,68	5,73

Продолжение табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
1,69	0,185	7,57	5,65
1,70	0,183	7,47	8,58
1,71	0,181	7,36	5,50
1,72	0,179	7,25	5,43
1,73	0,177	7,15	5,36
1,74	0,176	7,05	5,29
1,75	0,174	6,99	5,22
1,76	0,172	6,85	5,15
1,77	0,170	6,76	5,08
1,78	0,169	6,66	5,01
1,79	0,167	6,56	4,95
1,80	0,165	6,47	4,88
1,81	0,164	6,38	4,82
1,82	0,162	6,29	4,75
1,83	0,160	6,20	4,69
1,84	0,159	6,12	4,63
1,85	0,167	6,03	4,57
1,86	0,156	5,95	4,51
1,87	0,154	5,86	4,45
1,88	0,153	5,78	4,39
1,89	0,151	5,70	4,33
1,90	0,150	5,62	4,28
1,91	0,148	5,54	4,22
1,92	0,147	5,47	4,17
1,93	0,145	5,39	4,11
1,94	0,144	5,31	4,06
1,95	0,142	$5{,}24\cdot10^{-2}$	$4{,}01\cdot10^{-2}$
1,96	0,141	5,17	3,95
1,97	0,139	5,10	3,90
1,98	0,138	5,03	3,86
1,99	0,137	4,96	3,80
2,0	0,135	4,89	3,75
2,1	0,122	4,26	3,30
2,2	0,111	3,72	2,90
2,3	0,100	3,25	2,65
2,4	$9{,}07\cdot10^{-2}$	2,84	2,25
2,5	8,21	2,49	1,98
2,6	7,43	2,19	1,75
2,7	6,72	1,92	1,54
2,8	6,0	1,69	1,36

Продолжение табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
2,9	5,50	1,48	1,20
3,0	4,98	1,30	1,06
3,1	4,50	1,15	0,94
3,2	4,08	1,01	0,83
3,3	3,69	$8{,}94\cdot10^{-3}$	$7{,}38\cdot10^{-3}$
3,4	3,34	7,89	6,54
3,5	3,02	6,97	5,80
3,6	2,73	6,16	5,15
3,7	2,47	5,45	4,57
3,8	2,24	4,82	4,05
3,9	2,02	4,27	3,60
4,0	1,83	3,78	3,20
4,1	1,66	3,35	2,84
4,2	1,50	2,97	2,53
4,3	1,36	2,63	2,25
4,4	1,23	2,34	2,00
4,5	1,11	2,07	1,78
4,6	1,01	1,84	1,58
4,7	$9{,}10\cdot10^{-3}$	1,64	1,41
4,8	8,09	1,45	1,26
4,9	7,45	1,29	1,12
5,0	6,74	1,15	1,00
5,1	6,10	1,02	0,89
5,2	5,52	$9{,}09\cdot10^{-4}$	$7{,}92\cdot10^{-4}$
5,3	4,99	8,09	7,06
5,4	4,52	7,20	6,30
5,5	4,09	6,41	5,62
5,6	3,70	5,71	5,01
5,7	3,35	5,09	4,47
5,8	3,03	4,53	3,99
5,9	2,74	4,04	3,56
6,0	2,48	3,60	3,18
6,1	2,24	3,21	2,84
6,2	2,03	2,86	2,54
6,3	$1{,}84\cdot10^{-3}$	$2{,}55\cdot10^{-4}$	$2{,}27\cdot10^{-4}$
6,4	1,66	2,28	2,03
6,5	1,50	2,03	1,81
6,6	1,36	1,82	1,62
6,7	1,23	1,62	1,45
6,8	1,11	1,45	1,29
6,9	1,01	1,29	1,16

Окончание табл. 69

x	e^{-x}	$E_1(x) = -Ei(-x)$	$E_2(x)=\Phi(x)$
7,0	$9{,}12\cdot10^{-4}$	1,15	1,04
7,1	8,25	1,03	0,93
7,2	7,47	$9{,}22\cdot10^{-5}$	$8{,}28\cdot10^{-5}$
7,3	6,76	8,24	7,41
7,4	6,11	7,36	6,63
7,5	5,53	6,58	5,94
7,6	5,00	5,89	5,31
7,7	4,53	5,26	4,76
7,8	4,10	4,71	4,26
7,9	3,71	4,21	3,81
8,0	3,35	3,77	3,41
8,1	3,04	3,37	3,06
8,2	2,75	3,02	2,74
8,3	2,49	2,70	2,45
8,4	2,25	2,42	2,20
8,5	2,03	2,16	1,97
8,6	1,84	1,94	1,76
8,7	1,67	1,73	1,58
8,8	1,51	1,55	1,42
8,9	1,36	1,39	1,27
9,0	1,23	1,24	1,14
9,1	1,12	1,12	1,02
9,2	1,01	$9{,}99\cdot10^{-6}$	$9{,}15\cdot10^{-6}$
9,3	$9{,}12\cdot10^{-5}$	8,95	8,20
9,4	8,27	8,02	7,36
9,5	7,49	7,18	6,60
9,6	6,77	6,44	5,92
9,7	6,13	5,77	5,31
9,8	5,55	5,17	4,76
9,9	5,02	4,64	4,27
10,0	4,54	4,16	3,83
10,5	2,76	2,41	2,20
11,0	1,67	1,40	1,30
11,5	1,01	$8{,}15\cdot10^{-7}$	$7{,}50\cdot10^{-7}$
12,0	$6{,}13\cdot10^{-6}$	4,75	4,40
12,5	3,72	2,77	2,55
13,0	2,26	1,62	1,52
13,5	1,37	$9{,}50\cdot10^{-8}$	$9{,}00\cdot10^{-8}$
14,0	$8{,}30\cdot10^{-7}$	5,57	5,30
14,5	5,04	3,27	3,05
15,0	3,06	1,92	1,85

ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Таблица 70

Плотность H_2O в зависимости от температуры и давления

T	ρ при P, атм.			
	20	50	100	150
313	993	994	997	999
333	984	986	988	990
353	973	974	976	978
373	959	961	963	965
393	944	946	948	950
413	927	929	931	933
433	908	910	913	915
453	888	890	893	896
473	865	867	871	874
493	–	843	847	851
513	–	815	821	825
533	–	784	791	796
553	–	–	757	764
573	–	–	716	726
593	–	–	–	679
613	–	–	–	612

Таблица 71

Теплопроводность H_2O в зависимости от температуры и давления

T	λ при P, атм			T	λ при P, атм		
	1	100	200		100	200	300
313	0,627	0,632	0,637	473	0,664	0,671	0,678
323	0,64	0,645	0,65	483	0,655	0,662	0,669
333	0,65	0,656	0,663	493	0,645	0,652	0,659
343	0,661	0,666	0,673	503	0,634	0,643	0,559
363	0,677	0,683	0,69	513	0,622	0,632	0,638
373	0,683	0,6888	0,695	523	0,611	0,62	0,628
383	–	0,691	0,698	533	0,597	0,607	0,616
393	–	0,693	0,700	543	0,583	0,595	0,605
403	–	0,693	0,700	553	0,569	0,58	0,592
413	–	0,692	0,699	563	0,552	0,566	0,579
423	–	0,691	0,698	573	0,534	0,551	0,565
433	–	0,687	0,694	583	–	0,534	0,55
443	–	0,684	0,691	593	–	0,515	0,515
453	–	0,678	0,685	603	–	0,493	0,516
463	–	0,672	0,679	613	–	0,469	0,495

Таблица 72

Вязкость H_2O в зависимости от температуры и давления

T	$\mu \cdot 10^6$ при P, атм.				
	40	60	100	150	200
313	599,84	600,74	601,64	602,54	603,45
333	432,32	432,32	433,22	434,12	435,92
353	326,94	326,94	327,84	328,74	330,54
373	260,29	260,29	261,19	262,09	263,89
393	218,86	218,86	219,76	220,66	222,46
413	185,54	185,54	186,44	187,34	188,24
433	160,32	160,32	161,22	162,12	163,02
453	141,40	141,40	142,31	143,21	144,11
473	126,09	126,09	126,99	127,39	128,80
493	115,29	1 15,29	116,19	117,09	117,09
513	105,38	106,28	107,18	108,08	108,98
533	–	98,17	99,07	99,97	100,87
553	–	–	91,87	92,77	93,67
573	–	–	83,76	84,84	86,46
593	–	–	–	79,35	80,34
613	–	–	–	71,51	73,31
633	–	–	–	–	63,41

Таблица 73

Теплоёмкость H_2O в зависимости от температуры и давления

T	Ср при P, атм.				
	40	60	100	150	200
313	4170	4160	4150	4140	4130
333	4170	4170	4160	4150	4140
353	4190	4180	4170	4160	4150
373	4210	4200	4190	4180	4170
393	4230	4230	4220	4210	4200
413	4280	4270	4260	4240	4230
433	4330	4320	4300	4290	4270
453	4390	4380	4360	4340	4330
473	4480	4470	4440	4420	4390
493	4600	4590	4550	4510	4480
513	4750	4740	4690	4650	4600
533	–	4940	4880	4820	4760
553	–	–	5180	5080	4980
573	–	–	5650	5490	5320
593	–	–	–	6270	5920
613	–	–	–	–	11510

Таблица 74

Теплофизические свойства газообразной двуокиси углерода CO_2 в зависимости от температуры и давления

T	ρ	Cp	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
P = $9{,}807 \cdot 10^5$ Н/м^2 (10 атм)					
373	44,24	949	2,32	1,72	1,29
573	9,091	1065	3,93	4,06	2,91
773	6,707	1158	5,51	7,09	5,06
P = $19{,}61 \cdot 10^5$ Н/м^2					
373	29,17	985	2,39	0,83	0,631
573	18,22	1073	3,97	2,03	1,45
773	13,4	1162	5,53	3,55	2,54
P = $29{,}42 \cdot 10^5$ Н/м^2					
373	44,88	1026	2,46	0,534	0,414
573	27,41	1080	4,01	1,35	0,968
773	20,09	1166	5,56	2,37	1,69
P = $39{,}23 \cdot 10^5$ Н/м^2					
373	61,46	1074	2,55	0,386	0,306
573	36,66	1087	4,05	1,02	0,726
773	26,75	1171	5,59	1,78	1,27
P = $58{,}84 \cdot 10^5$ Н/м^2					
373	97,66	1182	2,76	0,239	0,2
573	55,31	1108	4,14	0,676	0,486
773	40,05	1177	5,65	1,2	0,854

Таблица 75

Теплофизические свойства эвтектического сплава 44 вес.% К – 56 вес. % Na

T	ρ	Cp	λ	$a \cdot 10^5$	$\nu \cdot 10^{10}$
300	907	1160	24,7	2,42	8,2
340	894	1139	25,2	2,58	7,2
370	885	1122	25,5	2,61	6,6
400	880	1114	25,8	2,70	6,0
450	868	1101	26,1	2,78	5,0
500	856	1084	26,4	2,89	4,2
550	845	1072	26,7	3,00	3,5
600	833	1059	27,0	3,11	3,0
650	820	1051	27,3	3,20	2,9
700	808	1047	27,6	3,28	2,7
750	797	1047	28,0	3,42	2,6
800	783	1046	28,4	3,50	2,4
850	770	1038	28,8	3,61	2,3
900	757	1043	28,9	3,72	2,3

Таблица 76

Теплофизические свойства эвтектического сплава 78 вес. % K – 22 вес. % Na

T	ρ	Ср	λ	$a \cdot 10^5$	$\nu \cdot 10^7$
300	868	971	21,52	2,50	8,30
340	857	950	22,33	2,67	6,92
370	848	942	22,91	2,86	6,24
400	841	930	23,49	3,00	5,60
450	828	913	24,42	3,22	4,78
500	817	900	25,00	3,45	4,20
550	805	888	25,50	3,62	3,78
600	794	879	25,93	3,75	3,45
650	782	879	26,17	3,83	3,20
700	768	879	26,23	3,89	3,00
750	757	879	26,21	3,97	2,86
800	746	879	26,17	4,03	2,72
850	733	879	25,99	4,09	2,60
900	720	879	25,82	4,11	2,50

Таблица 77

Некоторые свойства UO_2 и UC

Свойства	UC	UO_2
Теоретическая плотность, г/см^3	13,63	10,96
Точка плавления, °C	2400	2760
Теплопроводность, Вт/(м·К)	32,7	8,4
Коэффициент линейного расширения, 10^{-6} °C^{-1}	10–11	10
Модуль Юнга, ГПа	45	44
Прочность на растяжении, МПа	13	7,5–9,0

Таблица 78

Теплопроводность UC

T, °C	λ, Вт/(м·К)	T, °C	λ, Вт/(м·К)
25	32,4	265	21,0
45	32,7	500	7,32
60	33,6	750	7,11
115	31,1	1000	7,57
195	25,6	–	–

Таблица 79

Упругие характеристики UN и $(U_{0,85}\ Pu_{0,15})N$

Свойство	UN	$(U_{0,85}\ Pu_{0,15})N$
Модуль упругости, ГПа	46,5–53,5	43
Коэффициент Пуассона	0,26–0,28	0,275
Предел текучести, МПа	7,5–9,5	7,0–8,5

Таблица 80

Рекомендуемые для предварительных расчетов значения параметров металлов и сплавов

Свойство	A1 и его сплавы	Zr и его сплавы	Стали	Ni и его сплавы	Mg и его сплавы
Плотность, г /см^3	2,7	6,5	7,9	8,9	1,74
Температура плавления, °С	660	1852	1450	1430	650
Удельная теплоемкость, Дж/ (г ·К)	0,96	0,28	0,5	0,46	1,05
Теплопроводность, Вт/(м·К)	220	100	37	68	120
Коэффициент линейного расширения, 10^{-6} °С$^{-1}$	23,5	5,8	16,6	11,5	25,8
Предел прочности, МПа	160	400	515	600	185
Предел текучести, МПа	140	310	205	315	96
Модуль Юнга, ГПа	68	86,2	196	213	44,6
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35

Таблица 81

Свойства продавленного и прессованного графита

Свойство	Продавленный		Прессованный	
	Продольное направление	Поперечное направление	Продольное направление	Поперечное направление
Плотность, г /см^3	1,65	1,65	1,75	1,75
Теплопроводность, Вт/(м·К)	17,2	13,0	20,9	12,6
Коэффициент теплового расширения, 10^{-7} °С$^{-1}$	11	41	19	32
Прочность:				
на сжатие, МПа	42,0	40,0	40,0	38,0
на растяжение, МПа	14,0	13,0	13,2	12,5
на изгиб, МПа	35,6	34,0	36,8	35,0
Модуль Юнга, ГПа	12,8	5,6	9,8	6,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абагян Л.П., Базазянц Л.0., Бондаренко И.И. Групповые константы для расчёта ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1964. – 120 с.
2. Алешин В.Е., Кузнецов Н.М., Саркисов А.А. Судовые ядерные реакторы. – Л.: Судостроение, 1968. – 419 с.
3. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
4. Беляев С.А., Кузьмин А.В. Методика теплового и нейтронно-физического расчётов реактора на тепловых нейтронах. – Томск: Изд. ТПУ, 1981. – 81 с.
5. Бонилла Ч. Вопросы теплопередачи в ядерной технике. – М.: Госатомиздат, 1961. – 314 с.
6. Бродер Д.Я. и др. Бетон в защите ядерных установок. – М.: Атомиздат, 1966.
7. Бродер Д.Я. и др. Биологическая защита транспортных реакторных установок. – М.: Атомиздат, 1969.
8. Воскобойников В.В. Устройство и обслуживание оборудования АЭС. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
9. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. – М.: ИИЛ, 1954. – 458 с.
10. Владимиров В.И. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 300 с.
11. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1986.
12. Гордеев И.В. Справочник по ядерно-физическим константам для расчёта реакторов. – М.: Атомиздат, 1960. – 280 с.
13. Галанин А.Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1959. – 383 с.
14. Глесстон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов / пер. с англ. – М.: W, 1954. – 458 с.
15. Ганев И.Х. Физика и расчёт реактора. – М.: Энергоиздат, 1981. – 367 с.
16. Гусев Н.Г. и др. Защита от ионизирующих излучений. Т.1. – М.: Атомиздат, 1982.
17. Гусев Н.Г. и др. Защита от ионизирующих излучений. Т.2. – М.: Атомиздат, 1982.
18. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоиздат, 1984. – 182 с.
19. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов: учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 81 с.

20. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. – М.: Атомиздат, 1966. – 520 с.
21. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 316 с.
22. Инженерный расчет защиты атомных электростанций / под ред. Веселкина А.П. и Егорова Ю.А. – М.: Атомиздат, 1976.
23. Кесслер Г. Ядерная энергетика. – М.: Энергоиздат, 1986.
24. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1964.
25. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчётам. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 282 с.
26. Крамеров А.Я. Вопросы конструирования ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1971. – 328 с.
27. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчёты ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1964. – 360 с.
28. Кузнецов В.А. Судовые ядерные энергетические установки. – М.: Атомиздат, 1976. – 219 с.
29. Краткий справочник инженера-физика / под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Госатомиздат, 1964. – 507 с.
30. Кахан Г., Гози М. Физика и расчёт ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1960. – 250 с.
31. Кузнецов В.А. Компановка и расчёт реакторов судовых ядерных установок. – М.: Транспорт, 1966. – 219 с.
32. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы: учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
33. Конструирование ядерных реакторов / под ред. И.Я. Емельянова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 360 с.
34. Ма М.Б. Материалы ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
35. Марчук Г.И. Методы расчёта ядерных реакторов. – М.: Госатомиздат, 1961. – 666 с.
36. Меррей Р. Физика ядерных реакторов / пер. с англ.; под ред. Г.А. Батя. – М.: Атомиздат, 1959. – 292 с.
37. Мегреблиан Р., Холмс Д. Теория реакторов. – М.: Госатомиздат, 1962. – 670 с.
38. Наумов В.И., Хромова М.Ф. Физический расчёт канальных реакторов. – М.: Изд. МИФИ, 1985. – 72 с.
39. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1977. – 420 с.
40. Рудик А.П. Физические основы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1979. – 120 с.
41. Румянцев Г.Я. Расчёт ядерного реактора на тепловых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1967. – 124 с.
42. Сойгин М.Ф., Гусев А.Б., Лабинский Ю.Б. Судовые ядерные реакторы. – Л.: Судостроение, 1967. – 608 с.

43. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. 3-е изд. – М.: Физматгиз, 1959. – 559 с.
44. Самойлов А.Г. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965. – 343 с.
45. Серийный энергоблок с реактором ВВЭР-1000. Реакторная установка Минэнерго СССР. – Киев, 1982. – 70 с.
46. Самойлов О.Б., Усыкин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 278 с.
47. Субботин В.И., Номофилов С.В., Юрьев Ю.С. решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. – М.: Атомиздат, 1979.
48. Тепловыделение в ядерном реакторе / Глушков Е.С., Демин В.Е. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
49. Троянский В.Б. Проектирование водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Изд. МИФИ, 1985. – 40 с.
50. Улыбин С.А. Теплоносители энергетических ядерных установок. – М.: Энергия, 1966. – 320 с.
51. Федик И.И., Колосов В.С., Михайлов В.Н. Температурные поля и термонапряжения в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиадат. 1985. – 280 с.
52. Фейнберг С.М., Шихов С.Б., Троянский В.Б. Теория ядерных реакторов. Т. 1. – М.: Атомиздат, 1978. – 38 с.
53. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
54. Чиркин В.С. Теплофиэические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

I. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РЕАКТОРА И ВЫБОР
ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ 12

1.1. Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) 12
1.2. Реакторы с графитовым замедлителем 17
1.3. Тепловыделяющие элементы реакторов 28
1.4. Ядерно-топливные материалы 30
1.5. Материалы оболочек тепловыделяющих элементов 31
1.6. Топливные кассеты и сборки 33
1.7. Выгорающие поглотители нейтронов
для компенсации избыточной реактивности 35
1.8. Биологическая защита реактора (конструкции, материалы) 35

2. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
КРИТИЧЕСКОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕАКТОРА 41

2.1. Предварительный расчёт 41
2.2. Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора 43
2.3. Оптимизация параметров ячейки
и расчет коэффициента размножения 46
2.4. Расчёт эффективного коэффициента размножения 77
2.5. Температурные эффекты реактивности 79
2.6. Многогрупповой расчёт, спектр и ценности нейтронов
в активной зоне. Подготовка параметров
для двухгруппового расчета 96
2.7. Пространственно-энергетическое
распределение нейтронов. Уточнение $K_{эф}$ 101
2.8. Предварительный расчёт системы органов регулирования 105

3. ПАРАМЕТРЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ
НЕЙТРОННО-ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 110

3.1. Эффекты реактивности при отравлении реактора 110
3.2. Расчеты нуклидного состава и характеристик,
связанных с выгоранием топлива, образованием
продуктов деления и актинидов 129
3.3. Управление мощностью реактора 143

4. РАСЧЁТ ОБЪЁМНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПО ДЛИНЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА 162
4.1. Максимальные значения величин 162
4.2. Расчёт значений q_v, q_e и q_S по высоте наиболее энергонапряжённого (центрального) ТК 164
4.3. Расчёт температурного состояния ТН по длине ТК 165
4.4. Расчёт коэффициентов теплоотдачи с поверхности твэл 168
4.5. Расчёт распределения температуры в твэл 170
4.6. Распределение температуры в блоке замедлителя 173
4.7. Распределение температуры в органах регулирования 175
4.8. Гидравлический расчёт ТК 177
4.9. Оценка критических тепловых потоков 178
4.10. Оценка напряжённого состояния элементов конструкции ТК 179
4.11. Использование вычислительной техники при выполнении курсового проекта 180
5. ПАРАМЕТРЫ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА 207
5.1. Расчет потоков быстрых и тепловых нейтронов на поверхности активной зоны 207
5.2. Ослабление нейтронного излучения в первичной защите 209
5.3. Расчет мощности дозы нейтронного излучения 210
5.4. Расчет мощности гамма-излучения активной зоны (первичное гамма-излучение) 210
5.5. Расчет захватного (вторичного) гамма-излучения в защите 213
5.6. Расчет прохождения гамма-излучения через защиту 215
5.7. Расчет мощности дозы гамма-излучения за защитой 216
5.8. Расчет радиационной защиты корпуса реактора 217
5.9. Расчет радиационно-стимулированного тепловыделения в защите 219
5.10. Определение температуры радиационного разогрева бетона 220
5.11. Расчет активности теплоносителя первого контура 221
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ 226
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ: Часть 1. (пример) 232
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ: Часть 2. (пример) 280
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 335
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 382
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 499

Учебное издание

БОЙКО Владимир Ильич
КОШЕЛЕВ Феликс Петрович
ШАМАНИН Игорь Владимирович
КОЛПАКОВ Геннадий Николаевич
СЕЛИВАНИКОВА Ольга Валерьевна

ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Учебное пособие

Редактор	*С.П. Барей*
Компьютерная верстка	*К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки	*О.Ю. Аршинова* *О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 30.04.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,31. Уч.-изд. л. 26,51.
Заказ 934-09. Тираж 200 экз.

Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822) 56-35-35, www.tpu.ru