

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

**А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов
А.А. Лысенко, Ю.А. Чурсин**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ
УРАНА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 661.87(075.8)

ББК 35.36я73

Г71

Горюнов А.Г.

Г71

Математическое моделирование процесса экстракции урана как объекта управления: учебное пособие / А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов, А.А. Лысенко, Ю.А. Чурсин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 143 с.

ISBN 5-98298-340-3

Учебное пособие посвящено автоматизации радиохимических производств, содержит основы жидкостной экстракции и PUREX-процесса, примеры аппаратурного оформления радиохимических производств и включает описание существующих методов моделирования процесса экстракции урана и плутония. В нем представлены вопросы имитационного моделирования технологического процесса экстракции урана и плутония как объекта управления, показаны примеры способов и методов проверки адекватности математической модели и ее линеаризации.

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, обучающихся по специальности 140306 «Электроника и автоматика физических установок», а также магистрантов, обучающихся по программе 220200 «Автоматизация и управление».

УДК 661.87(075.8)

ББК 35.36я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор, заместитель
главного инженера ОАО «Сибирский химический комбинат»

В.В. Лазарчук

Доктор технических наук, профессор, первый проректор
Северской государственной технологической академии

Б.М. Кербель

ISBN 5-98298-340-3

© Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н., Лысенко А.А.,
Чурсин Ю.А., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Технологический процесс переработки облученного ядерного топлива.....	8
1.1. Переработка облученного ядерного топлива.....	8
1.2. Особенности переработки отработавшего ядерного топлива.....	10
1.3. Подготовка отработанного ядерного топлива к экстракции.....	12
1.4. Растворение ядерного топлива	14
1.5. Экстракционная очистка и выделение урана, плутония и нептуния.....	16
1.6. Аппаратурное оформление радиохимических производств.	33
2. Анализ установки по переработки облученного ядерного топлива как объекта управления.....	42
2.1. Установка «Утес» радиохимического завода Сибирского химического комбината	42
2.2. Структура технических средств измерения и контроля технологических параметров.....	46
2.3. Анализ технологического процесса экстракции урана и плутония	60
3. Математическая модель процесса экстракции урана	70
3.1. Методы моделирования процесса экстракции.....	70
3.2. Имитационная модель экстракционной колонны.....	74
4. Проверка адекватности математической модели	90
5. Линеаризация математической модели	96
5.1. Исследование статических характеристик зависимостей имитационной модели колонны	97
5.2. Исследование влияния работы пульсационной камеры на амплитуду пульсаций жидкости в колонне.....	102
5.3. Исследование влияния параметров потоков ВФ1–ВФ4, ОФ и амплитуды пульсаций жидкости в колонне на основные переменные	106
5.4. Исследование влияния распределения урана по высоте колонны на ее параметры и контролируемые переменные	121
5.5. Выводы по результатам исследований имитационной модели экстракционной колонны.....	127
5.6. Линейная математическая модель экстракционной колонны.....	128
5.7. Управляющие воздействия и регулируемые величины	134
Список литературы	140

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВОЗ	– верхняя отстойная зона
ВПН	– выносной пульсационный насос
ВФ	– водная фаза
ДМ	– демпфер
ДФ	– дисперсная фаза
ЗДФ	– задержка дисперсной фазы
ЗДФВ	– величина задержки дисперсной фазы в экстракционной колонне, определенная по верхнему измерительному сосуду
ЗДФН	– величина задержки дисперсной фазы в экстракционной колонне, определенная по нижнему измерительному сосуду
ИМ	– исполнительный механизм постоянной скорости
НОЗ	– нижняя отстойная зона
ОФ	– органическая фаза
ОЯТ	– облученное ядерное топливо
П	– пульсатор
ПВ	– промывная вода (промвода)
ПК	– пульсационная камера
ПКМ	– показатель (индикатор) концентрации металла
ПН	– пульсационный насос
Р	– ресивер
РАО	– радиоактивные отходы
РР	– реэкстракт
РФ	– рафинат
С _u , С _к	– концентрация урана и кислоты
СП	– сепаратор
СПЛ	– сплошная фаза
ТБФ	– трибутилфосфат
ТВС	– тепловыделяющая сборка
УН	– уранилнитрат
Э (экстр)	– экстракт
ЭК	– экстракционная колонна
ЯТЦ	– ядерный топливный цикл

ВВЕДЕНИЕ

Замкнутый ядерный топливный цикл (ЯТЦ) является обязательным условием развития современной крупномасштабной ядерной энергетики. Но замкнутый цикл не возможен без радиохимической переработки ядерного топлива [1].

Все коммерческие перерабатывающие заводы за рубежом и радиохимические заводы в России для переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) используют PUREX-процесс. Это водно-экстракционный процесс выделения из раствора топлива урана и плутония и их последующей очистки. В процессах выделения и очистки экстрагентом служит раствор трибутилфосфата $(C_4H_9O)_3PO$ (ТБФ) в легком углеродном разбавителе. Это хорошо известная технология была разработана еще в 50-е годы для выделения и очистки оружейного плутония из облученных урановых блоков промышленного реактора [2, 3, 4].

Отработанное топливо АЭС транспортируют из бассейнов для промежуточного хранения, расположенных на территории АЭС, в бассейны на перерабатывающем заводе. Далее проводят выделение урана и плутония, каждый из которых подвергают очистке в трех экстракционных циклах. В первом цикле осуществляют совместную очистку урана и плутония от основной массы продуктов деления, а затем проводят разделение урана и плутония. На втором и третьем циклах уран и плутоний подвергают дальнейшей раздельной очистке и концентрированию. Полученные продукты – уранилнитрат и нитрат плутония – помещают в буферные емкости до передачи их в конверсионные установки [2, 4, 5].

Схема PUREX-процесса предусматривает совместную экстракцию $U(VI)$ и $Pu(IV)$ из 1–4 М азотной кислоты трибутилфосфатом в инертном разбавителе для сброса основной массы продуктов деления, которые остаются в водном растворе. После промывки экстракта U и Pu разделяют селективной реэкстракцией Pu разбавленной азотной кислотой в присутствии восстановителя-гидразина (NH_2OH) и (U^{4+}) . При этом $Pu(III)$ переходит в водную фазу. Оставшийся в органической фазе уран реэкстрагируют разбавленным раствором азотной кислоты (первый цикл). Дальнейшую очистку проводят отдельно в урановой (второй цикл) и плутониевой ветви (третий цикл) с помощью повторных циклов экстракции или с привлечением сорбционных процессов [3, 4, 5].

Для применения PUREX-процесса к переработке ОЯТ энергетических реакторов потребовались многолетние усилия больших коллективов

специалистов в разных странах мира. В настоящее время есть решения по применению PUREX-процесса к переработке ОЯТ этих реакторов [2].

Каждый завод радиохимического производства состоит из следующих отделений [2]: отделение приема и хранения ОЯТ; отделение подготовки ОЯТ к переработке; отделение резки-растворения и подготовки раствора топлива к экстракционной переработке; отделение экстракционной очистки урана и плутония от продуктов деления и разделение между собой (первый цикл PUREX-процесса); аффинажное отделение для окончательной очистки уранового и плутониевого продуктов; отделение концентрирования уранового и плутониевого продуктов и их денитрации или оксалатного осаждения с прокаливанием; разнообразные установки для переработки газообразных, жидких и твердых радиоактивных отходов (РАО).

В первом разделе учебного пособия представлены основы технологического процесса переработки облученного и отработанного ядерного топлива. Показаны основные закономерности жидкостной экстракции и PUREX-процесса, необходимые для построения математической модели процесса экстракции металла как объекта управления. В качестве примера объекта автоматизации в учебном пособии рассмотрена установка «Утес» радиохимического завода Сибирского химического комбината (РХЗ СХК).

Во втором разделе представлен пример анализа установки по переработке облученного ядерного топлива как объекта управления. Показаны способы представления результатов анализа.

В третьем разделе учебного пособия представлена математическая модель процесса экстракции урана. Приведены способы и методы моделирования экстракционных процессов. Представлены вопросы имитационного моделирования технологического процесса экстракции урана как объекта управления в программном пакете *Matlab/Simulink*.

В четвертом разделе показан алгоритм и пример проверки адекватности математической модели.

Пятый раздел учебного пособия содержит пример использования имитационной модели для исследования технологического процесса экстракции урана как объекта управления. Представлены результаты исследований:

- статических характеристик зависимостей имитационной модели с целью проверки возможности ее линеаризации;
- влияния режима работы экстракционной колонны на технологические переменные;
- влияния распределения урана по высоте колонны на параметры модели и контролируемые переменные;

- влияния параметров потоков водных и органических фаз (расходы и концентрации урана) на основные контролируемые переменные колонны;
- влияния амплитуды пульсаций жидкости в колонне на основные контролируемые переменные.

Пятый раздел учебного пособия включает пример линеаризации математической модели и использования для этих целей математического аппарата теории автоматического управления.

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения основ математического моделирования экстракционных процессов как объектов управления магистрантами, обучающимися по направлению 220200 «Автоматизация и управление».

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

1.1. Переработка облученного ядерного топлива

Переработку облученного ядерного топлива проводят с целью извлечения из него делящихся радионуклидов (прежде всего урана-233, 235 и плутония-239), очистки урана от нейтронопоглощающих примесей, выделения нептуния и некоторых других трансурановых элементов, получения некоторых изотопов для промышленных, научных или медицинских целей. Под переработкой ядерного топлива мы будем иметь в виду как переработку твэлов энергетических, научных или транспортных реакторов, так и переработку бланкетов реакторов-размножителей. Радиохимическая переработка ОЯТ – основная стадия закрытого варианта ЯТЦ а также обязательная стадия наработки оружейного плутония [6, 7].

Напомним, что в России перерабатывается облученный уран реакторов-бридеров и твэлы реакторов ВВЭР-440, БН и некоторых судовых двигателей. Твэлы основных типов энергетических реакторов ВВЭР-1000, РБМК (любых типов) не перерабатываются и в настоящее время накапливаются в специальных хранилищах.

Переработка делящегося материала и облученного нейтронами в ядерном реакторе топлива осуществляется для решения следующих задач:

- получение урана и плутония для производства нового топлива; получение делящихся материалов (урана и плутония) для производства ядерных боеприпасов; получение разнообразных радиоизотопов, находящихся применение в медицине, промышленности и науке;
- получение доходов от других стран, которые либо заинтересованы в первом и втором, либо не хотят хранить у себя большие объёмы ОЯТ;
- решение экологических проблем, связанных с захоронением радиоактивных отходов (РАО).

В настоящее время количество ОЯТ постоянно увеличивается и его регенерация является основной задачей радиохимической технологии переработки отработавших твэлов. В процессе переработки сначала проводится выделение урана и плутония и очистка их от радиоактивных продуктов деления, в том числе от нейтронопоглощающих нуклидов (нейтронных ядов), которые при повторном использовании делящихся материалов могут препятствовать развитию в реакторе цепной ядерной реакции [6, 7].

Радиохимическая технология переработки ОЯТ должна обеспечивать извлечение всех нуклидов, полезных с практической точки зрения или представляющих научный интерес.

Процесс химической переработки отработавшего топлива связан с решением проблемы изоляции от биосферы большого количества радионуклидов, образующихся в результате деления ядер урана. Эта проблема – одна из наиболее серьезных и трудно решаемых проблем развития ядерной энергетики.

Первая стадия радиохимического производства включает подготовку топлива, т. е. освобождение его от конструкционных деталей сборок и разрушение защитных оболочек твэлов. После этого топливная композиция становится доступной для действия химических реагентов.

Следующая стадия связана с переводом ядерного топлива в ту фазу, из которой будет производиться химическая обработка: в раствор, в расплав и в газовую фазу. Перевод в раствор чаще всего производят растворением в азотной кислоте. При этом уран переходит в шестивалентное состояние и образует ион уранила (UO_2^{2+}), а плутоний – частично в шести- и четырехвалентное состояние (PuO_2^{2+}) и (Pu^{4+}), соответственно. Перевод в газовую фазу связан с образованием летучих галогенидов урана и плутония. После перевода ядерных материалов в соответствующую фазу проводят ряд операций, непосредственно связанных с выделением, очисткой ценных компонентов и выдачей каждого из них в форме товарного продукта.

Переработка (репроцессинг) ОЯТ заключается в извлечении урана, накопленного плутония и фракций осколочных элементов (96 % ОЯТ – это ^{235}U и ^{238}U , около 1 % – Pu, 2–3 % – радиоактивные осколки деления). В 1 т ОЯТ на момент извлечения из реактора содержится 950–980 кг ^{235}U и ^{238}U , 5,5–9,6 кг Pu, а также небольшое количество α -излучателей (нептуний, америций, кюрий и др.), активность которых может достигать 26 тыс. Ки на 1 кг ОЯТ. Именно эти элементы в ходе замкнутого ЯТЦ необходимо выделить, сконцентрировать, очистить и перевести в необходимую химическую форму.

Технологический процесс переработки ОЯТ включает:

- механическую фрагментацию (рубку) ТВС и твэлов с целью вскрытия топливного материала;
- растворение;
- очистку растворов балластных примесей;
- экстракционное выделение и очистку урана, плутония и других товарных нуклидов;
- выделение диоксида плутония, диоксида нептуния, гексагидрата нитрата уранила и закиси-окиси урана;
- переработку растворов, содержащих другие радионуклиды, и их выделение.

В основе технологии выделения урана и плутония, их разделения и очистки от продуктов деления лежит процесс экстракции урана и плутония трибутилфосфатом. Он осуществляется на многоступенчатых экстракторах непрерывного действия. В результате уран и плутоний очищаются от продуктов деления в миллионы раз. Переработка ОЯТ связана с образованием небольшого объема твердых и газообразных РАО активностью около 0.22 Ки/год (предельно допустимый выброс 0.9 Ки/год) и большим количеством жидких радиоактивных отходов.

1.2. Особенности переработки отработавшего ядерного топлива

Твэлы энергетических реакторов существенно отличаются от твэлов реакторов для производства плутония. Для наработки плутония используют реакторы на тепловых нейтронах с низким температурным потенциалом. Топливо этих реакторов содержит природный или низкообогащенный металлический уран либо его сплавы в оболочках из алюминия или магния и его сплавов. Такие композиции предназначены только для использования при температуре ниже 20 °С. В химическом отношении это сравнительно легко растворимые композиции [6, 7].

Развитие ядерной энергетики потребовало создания реакторов с более высоким температурным потенциалом для производства перегретого пара. Твэлы энергетических реакторов изготавливают из термостойких UO_2 или PuO_2 , из смешанных уранплутониевых окислов ($UO_2 \cdot PuO_2$). Для реакторов-размножителей на быстрых нейтронах перспективно топливо на основе карбидов UC , PuC , $(U, Pu)C$ и нитридов UN , PuN , $(U, Pu)N$. Это топливо имеет большую, по сравнению с окислами, теплопроводность.

Оболочки твэлов изготавливают также из термостойких, механически прочных и коррозионно-стойких материалов с высокой теплопроводностью. Как правило, это цирконий и его сплавы или нержавеющая сталь. Оболочки из циркония позволяют повысить температуру активной зоны реактора до 540 °С, а из нержавеющей стали – до 800 °С и выше, в зависимости от ее состава. Однако большое количество железа в конструкционных материалах приводит к необходимости увеличивать количество делящихся материалов в сердечниках твэлов, т. е. использовать более высокообогащенное ядерное топливо, так как железо, а также примеси кобальта и никеля имеют большое сечение захвата тепловых нейтронов. Все конструкционные материалы отличаются химической стойкостью, и растворение их представляет серьезную проблему. Кроме делящихся материалов твэлы могут содержать различные накопители и покрытия, состоящие из нержавеющей стали, циркония, мо-

либдена, кремния, графита, хрома и др. При растворении ядерного топлива эти вещества не растворяются в азотной кислоте и создают в полученном растворе большое количество взвесей и коллоидов [6, 7].

Перечисленные особенности твэлов обусловили необходимость разработки новых методов вскрытия или растворения оболочек, а также осветления растворов ядерного топлива перед экстракционной переработкой [6, 7].

Глубина выгорания топлива реакторов для получения плутония существенно отличается от глубины выгорания твэлов энергетических реакторов. Если первые имеют глубину выгорания 0,3–0,5 ГВт·сут/т U, то глубина выгорания в энергетических реакторах на тепловых нейтронах составляет 15–40 ГВт·сут/т U, а в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах достигает 100 ГВт·сут/т U и выше. Поэтому на переработку поступают материалы с гораздо более высоким содержанием радиоактивных осколочных элементов и плутония на 1 т U. Это приводит к повышению требований к процессам очистки получаемых продуктов и к обеспечению ядерной безопасности в процессе переработки. Дополнительные трудности возникают также в связи с необходимостью переработки и захоронения большого количества жидких высокоактивных отходов. С переходом радиохимической промышленности на переработку твэлов энергетических реакторов возник комплекс задач, решение которых потребовало существенной модернизации ранее разработанных технологических процессов [6, 7].

Обработанное топливо АЭС транспортируют из бассейнов для промежуточного хранения, расположенных на территории АЭС, в бассейны на перерабатывающем заводе. Далее проводят выделение урана и плутония, каждый из которых подвергают очистке в трех экстракционных циклах. В первом цикле осуществляют совместную очистку урана и плутония от основной массы продуктов деления, а затем проводят разделение урана и плутония. На втором и третьем циклах уран и плутоний подвергают дальнейшей отдельной очистке и концентрированию. Полученные продукты – уранилнитрат и нитрат плутония – помещают в буферные емкости до передачи их в конверсионные установки. В раствор нитрата плутония добавляют щавелевую кислоту, образующую суспензию оксалата фильтруют, осадок кальцинируют и охлаждают. Полученную порошкообразную окись плутония просеивают через сито, помещают в контейнеры и взвешивают. В таком виде плутоний хранят до того, как он поступит на завод по изготовлению новых твэлов [6, 7].

Основные технологические показатели такого процесса: коэффициенты очистки U от Pu – 107; от U – 106; U от продуктов деления (ПД) – 107; Pu от ПД – 108; извлечение урана и плутония – более 99 %.

1.3. Подготовка отработанного ядерного топлива к экстракции

Сборки твэлов на перерабатывающем заводе с помощью погрузочно-разгрузочных механизмов перегружаются из контейнеров в заводской буферный бассейн-хранилище. Здесь сборки хранят до тех пор, пока их не направляют на переработку. После выдержки в бассейне в течение срока, выбранного на данном заводе, ТВС выгружают из хранилища и направляют в отделение подготовки топлива к экстракции на операцию вскрытия отработавших твэлов [6, 7].

Отделение материала оболочки твэлов от топливной оболочки – одна из наиболее сложных в техническом отношении задач процесса регенерации ядерного топлива.

Существующие методы можно разделить на две группы [6, 7]: методы вскрытия с отделением материалов оболочки от материалов сердечника твэлов и методы вскрытия без отделения материалов оболочки от материала сердечника. Первая группа предусматривает снятие оболочки твэлов и удаление конструкционных материалов до растворения ядерного топлива. Водно-химические методы заключаются в растворении материалов оболочки в растворителях, не затрагивающих материалы сердечника. Использование этих методов характерно для переработки твэлов из металлического урана в оболочках из алюминия или магния и его сплавов. Алюминий легко растворяется в едком натре или азотной кислоте, а магний – в разбавленных растворах серной кислоты при нагревании. После растворения оболочки сердечник растворяют в азотной кислоте.

Однако твэлы современных энергетических реакторов имеют оболочки из коррозионно-стойких, труднорастворимых материалов: циркония; сплавов циркония с оловом (циркалой) или с ниобием; нержавеющей стали. Селективное растворение этих материалов возможно только в высокоагрессивных средах. Цирконий растворяют в плавиковой кислоте, в смесях ее со щавелевой или азотной кислотой или растворе NH_4F . Оболочку из нержавеющей стали растворяют в кипящей серной кислоте (4–6 М H_2SO_4). Основной недостаток химического способа снятия оболочек – образование большого количества сильнозасоленных жидких радиоактивных отходов.

Чтобы уменьшить объём отходов от разрушения оболочек и получить эти отходы сразу в твёрдом состоянии – более пригодном для длительного хранения – разрабатывают процессы разрушения оболочек под воздействием неводных реагентов при повышенной температуре (пирохимические методы). Оболочку из циркония снимают безводным хлористым водородом в псевдооживленном слое Al_2O_3 при 350–800 °С.

Цирконий превращается при этом в летучий $ZrCl_4$ и отделяется от материала сердечника сублимацией, а затем гидролизуется, образуя твердую двуокись циркония. Пирометаллургические методы основаны на прямом оплавлении оболочек или растворении их в расплавах других металлов. Эти методы используют различие в температурах плавления материалов оболочки и сердечника или различие их растворимости в других расплавленных металлах или солях [6, 7].

Механические методы снятия оболочек включают несколько стадий. Сначала отрезают концевые детали тепловыделяющей сборки и разбирают ее на пучки твэлов и на отдельные твэлы. Затем механически снимают оболочки отдельно с каждого твэла.

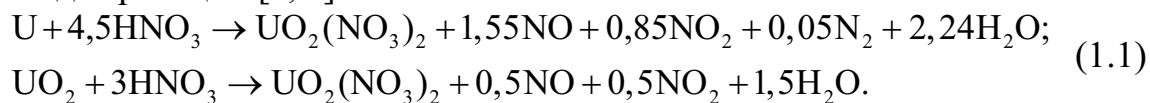
Вскрытие твэлов может проводиться без отделения материалов оболочки от материала сердечника. При реализации водно-химических методов оболочку и сердечник растворяют в одном и том же растворителе с получением общего раствора. Совместное растворение целесообразно в тех случаях, когда перерабатывают топливо с высоким содержанием ценных компонентов (^{235}U и Pu) или когда на одном заводе перерабатывают разные виды топлива, причём твэлы различаются размером и конфигурацией. В случае пирохимических методов твэлы обрабатывают газообразными реагентами, которые разрушают не только оболочку, но и сердечник твэлов [6, 7].

Удачной альтернативой методам вскрытия с одновременным удалением оболочки и методам совместного разрушения оболочки и сердечников оказался метод *рубка-выщелачивание*. Метод пригоден для переработки твэлов в оболочках, не растворимых в азотной кислоте. Целые сборки твэлов или отдельные твэлы в оболочках разрезают на мелкие куски, обнаружившийся сердечник твэла становится доступным действию химических реагентов и растворяется в азотной кислоте. Нерастворившиеся оболочки твэлов отмывают от остатков задержавшегося в них раствора и удаляют в виде скрапа. Рубка твэлов имеет определенные преимущества. Образующиеся отходы – остатки оболочек – находятся в твёрдом состоянии, т. е. не происходит образования жидких радиоактивных отходов (как при химическом растворении оболочки); не происходит и значительных потерь ценных компонентов (как при механическом снятии оболочек), так как отрезки оболочек могут быть отмыты с большой степенью полноты; конструкция разделочных машин упрощается в сравнении с конструкцией машин для механического снятия оболочек. Недостаток метода рубки-выщелачивания – сложность оборудования для рубки твэлов и необходимость его дистанционного обслуживания. В настоящее время исследуют возможность замены механических способов рубки на электролитический и лазерный методы [6, 7].

В отработанных твэлах энергетических реакторов высокой и средней глубины выгорания накапливается большое количество газообразных радиоактивных продуктов, которые представляют серьёзную биологическую опасность: тритий, йод и криптон. В процессе растворения ядерного топлива они в основном выделяются и уходят с газовыми потоками, но частично остаются в растворе, а затем распределяются в большом количестве продуктов по всей цепочке переработки. Особые неприятности при этом доставляет тритий, образующий тритированную воду НТО, которую затем трудно отделить от обычной воды Н₂О. Поэтому на стадии подготовки топлива к растворению вводят дополнительные операции, позволяющие освободить топливо от основной массы радиоактивных газов, сосредоточив их в небольших объёмах сбросных продуктов. Куски оксидного топлива подвергают окислительной обработке кислородом при температуре 450–470 °С. При перестройке структуры решетки оксидного топлива в связи с переходом UO₂–U₃O₈ происходит выделение газообразных продуктов деления – Т, I, благородных газов. Разрыхление топливного материала при выделении газообразных продуктов, а также при переходе двуокиси урана в закись-окись способствует ускорению последующего растворения топливных материалов в азотной кислоте [6, 7].

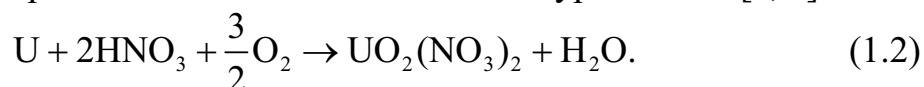
1.4. Растворение ядерного топлива

Выбор метода перевода ядерного топлива в раствор зависит от химической формы топливной композиции, способа предварительной подготовки топлива, необходимости обеспечения определенной производительности. Металлический уран растворяют в 8–11 М HNO₃, а двуокись урана – в 6–8 М HNO₃ при температуре 80–100 °С. При этом происходят реакции [6, 7]:



Разрушение топливной композиции при растворении приводит к освобождению всех радиоактивных продуктов деления. При этом газообразные продукты деления попадают в систему сброса отходящих газов. Перед выбросом в атмосферу сбросные газы очищают.

Лучше растворение проводить в присутствии кислорода. В этом случае процесс протекает без выделения газов по уравнению [6, 7]:



Расход кислоты снижается, а радиоактивные ксенон, криптон и пары йода не разбавляются азотом и окислами азота.

Большая часть негазообразных продуктов деления растворяется в азотной кислоте с образованием нитратов соответствующих элементов. Однако при высокой степени выгорания топлива, когда количества образующихся продуктов деления достигают килограммов на 1 т U, часть труднорастворимых осколочных элементов полностью в раствор не переходит и образует нерастворимые взвеси. К таким элементам относятся, прежде всего, рутений и молибден. В нерастворенном виде остается часть углерода и кремния, которые могут присутствовать как в материале сердечника, так и в смазочных материалах. Растворение и выщелачивание ядерного топлива осуществляют в периодическом, полунепрерывном и непрерывном режимах. Для каждого из этих режимов разработаны многочисленные конструкции аппаратов-растворителей.

Полученный в процессе растворения азотнокислый раствор ядерного топлива, содержащий все сопутствующие компоненты (продукты деления, конструкционные материалы, примеси), направляют на дальнейшую переработку. Эффективность процесса экстракции, и в частности бесперебойная работа экстракционного оборудования, достижение запланированных коэффициентов очистки ценных компонентов от продуктов деления и получение высоких коэффициентов разделения урана и плутония во многом зависят от состава раствора, поступающего на экстракцию. При этом кроме факторов, непосредственно влияющих на коэффициенты очистки и разделения (общая концентрация солей в растворе, концентрация кислоты, окислителей, восстановителей, присутствие комплексообразователей и т. д.), на ход экстракционных процессов влияют присутствующие в растворе макровзвеси и коллоиды.

Особенно много взвесей образуется при растворении твэлов с большой глубиной выгорания, а также твэлов, содержащих труднорастворимые материалы (нержавеющая сталь, цирконий, кремний, углерод). В процессе экстракции взвеси концентрируются на границе раздела фаз, образуя пленки, стабилизирующие капли эмульсии и уменьшающие скорость расслаивания фаз. При значительном накоплении взвесей в зоне расслаивания образуется объёмный осадок, который резко нарушает режим работы экстракционных аппаратов, снижает их производительность, эффективность и длительность бесперебойной работы. Высокое тепловыделение радиоактивных осадков вызывает местные перегревы. Это приводит к усилению разрушения экстрагента, а затем – к образованию стабилизированных эмульсий. Эти осадки захватывают из раствора значительное количество ценных компонентов, что приводит к снижению коэффициентов очистки. Поэтому на стадии подготовки растворов к экстракции серьёзное внимание уделяется их осветлению.

Для осветления растворов в промышленных условиях чаще всего используют центрифугирование или фильтрацию через твёрдые фильтрующие материалы. Осветление растворов предусматривает удаление не только нерастворенных взвешенных частиц, но и содержащихся в растворе веществ, таких как кремниевая кислота, цирконий, молибден и другие компоненты. Для этого используют их флокуляцию с помощью водорастворимых органических соединений с последующим удалением образующихся осадков вместе с другими взвесьями центрифугированием или фильтрованием.

Окончательную подготовку исходного раствора ядерного топлива к экстракции проводят в специальных аппаратах для корректировки кислотности и состава раствора. Аппараты снабжены нагревателем и используются для упаривания. Стадия корректировки исходного раствора включает стабилизацию плутония и нептуния в экстрагируемом четырех- и шестивалентном состоянии, которую проводят нитритом натрия или окислами азота. В случае переработки топлива с высоким содержанием плутония целесообразно осуществлять его электрохимическое окисление, чтобы избежать введения в раствор большого количества солеобразующих веществ, увеличивающих объём высокоактивных сбросов.

1.5. Экстракционная очистка и выделение урана, плутония и нептуния

Экстракция – один из наиболее эффективных методов разделения и очистки, применяемый в настоящее время как в лабораторной практике, так и на промышленном производстве. Сущность экстракционного метода разделения заключается в том, что при определенных условиях отдельные элементы в виде солей или иных соединений могут в заметных количествах переходить из водного раствора в не смешивающийся с водой органический растворитель, отделяясь при этом от других элементов [8].

Основными преимуществами экстракционных методов разделения являются: высокая избирательность, быстрота процесса и простота технологии. С помощью экстракции можно получить высокие коэффициенты разделения, достижение которых невозможно многими другими методами, например в осадительных процессах. Экстракционные методы одинаково хорошо применимы для выделения как макро-, так и микроконцентраций вещества. Все эти преимущества экстракции имеют особое значение в радиохимии при выделении отдельных естественных или искусственных радиоактивных изотопов, при переработке ядерного горючего и при очистке различных нерадиоактивных материалов, используемых в атомной энергетике. Так, с помощью экстракции успешно решается задача быстрого выделения радиоактивных изотопов с малы-

ми периодами полураспада. В химической переработке ядерного горючего экстракционные методы используют как для отделения урана и плутония от продуктов деления, так и для извлечения отдельных ценных элементов из оставшейся смеси продуктов деления и нерадиоактивных материалов оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) [8].

В технологической схеме, которая получила название PUREX-процесса (рис. 1.1. и 1.2), раствор, содержащий U(VI), Pu(IV), продукты деления (ПД) экстрагируют раствором ТБФ в керосине. При этом U(VI), Pu(IV) и частично ПД переходят в органическую фазу, а основная часть ПД остается в водной фазе. Затем плутоний восстанавливают раствором четырехвалентного урана с гидразином (NH₂OH) до Pu³⁺. Вновь проводят экстракцию ТБФ в керосине. Уран и часть ПД переходят в органическую фазу, трехвалентный плутоний экстрагируется плохо и остается в водном растворе. Уран реэкстрагируют водой [6, 7].

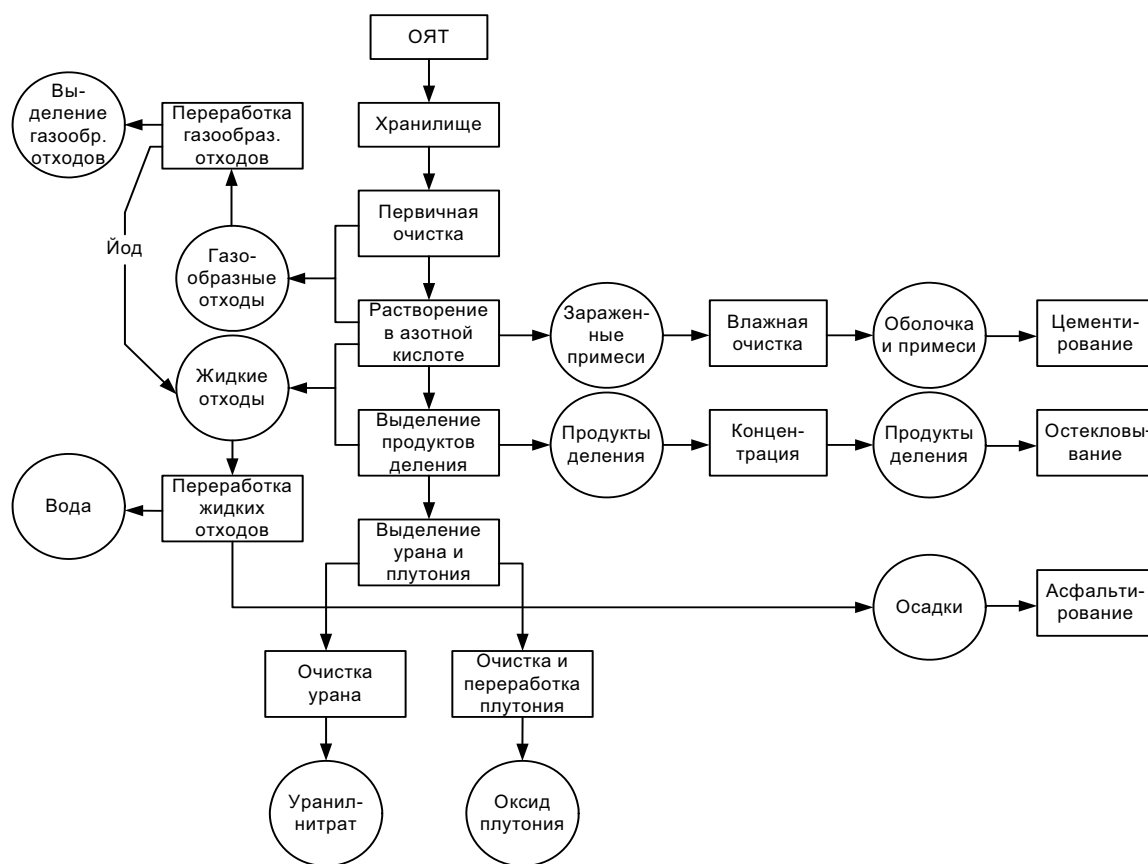


Рис. 1.1. Схема PUREX-процесса

В REDOX-процессе после растворения ТВЭЛ в азотной кислоте плутоний окисляют бихроматом калия до шестивалентного состояния, затем извлекают его вместе с ураном экстракцией с гексоном из раствора алюминия в HNO₃ при недостатке азотной кислоты, что предотвращает окисление гексона азотной кислотой. Уран и плутоний переходят в органиче-

скую фазу, а ПД остаются в водной фазе. Органическую фазу очищают от продуктов деления промыванием с помощью раствора нитрата алюминия. Затем уран и плутоний реэкстрагируют разбавленной HNO_3 . Далее плутоний восстанавливают до Pu^{3+} , оставляя уран в степени окисления U^{6+} , и разделяют их экстракцией урана гексоном. U(VI) переходит в органическую фазу, а Pu(III) – в водную. Затем уран реэкстрагируют разбавленной азотной кислотой, а плутоний подвергают дополнительным операциям очистки [6, 7].

В настоящее время на заводах технологическая схема переработки облученного ядерного топлива промышленных реакторов на тепловых нейтронах включает экстракционную технологию с использованием ТБФ в керосине. На рис. 1.2 представлена типовая схема экстракционного разделения раствора ядерного топлива, облученного на промышленном реакторе.

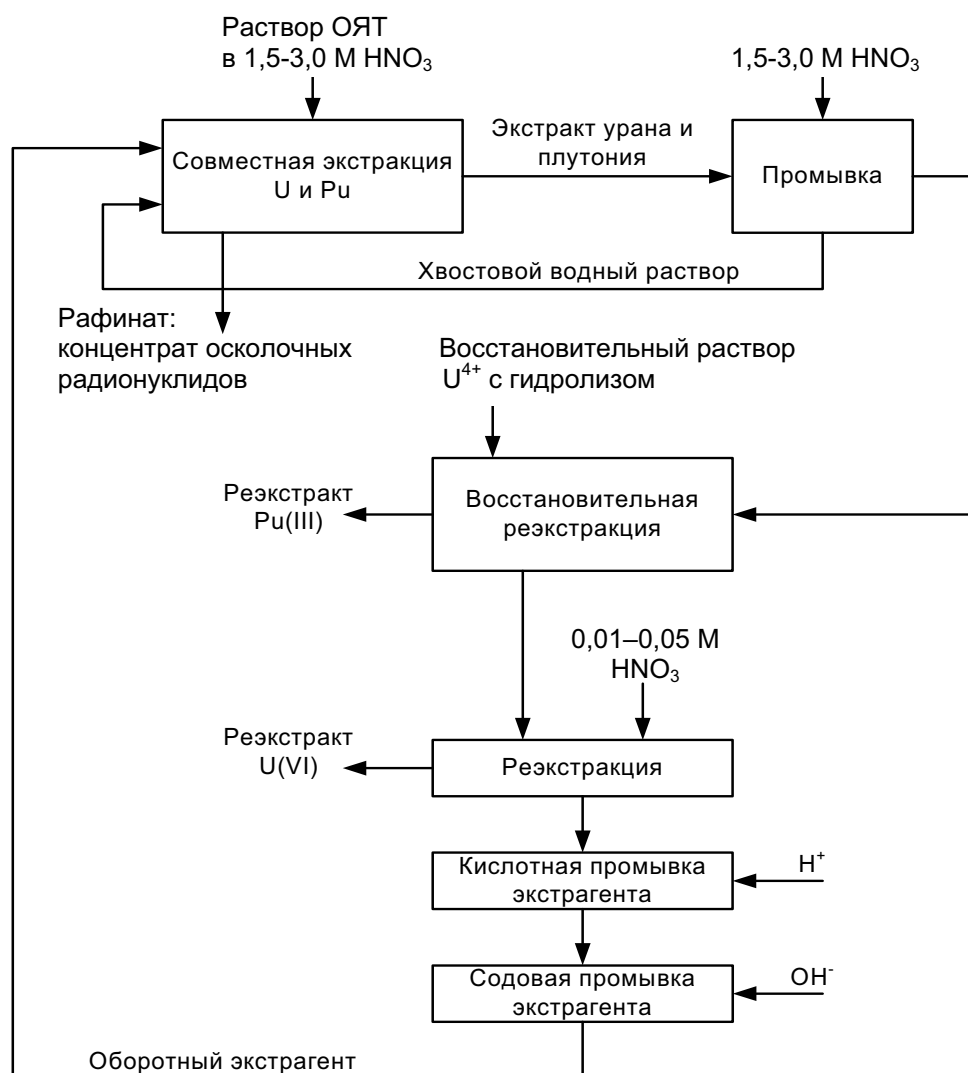


Рис. 1.2. Схема экстракционного разделения раствора ОЯТ

Для применения PUREX-процесса к переработке отработанного топлива энергетических реакторов (в частности ВВЭР-1000) потребовались многолетние усилия многих коллективов специалистов в разных странах мира. Необходимость проведения дополнительных объёмов НИОКР была вызвана различием качественного и количественного химического состава, а также ядерно-физических характеристик топлива энергетических реакторов и урановых блоков.

Главными причинами усложнения состава ОЯТ энергетических реакторов по сравнению с составом урановых блоков ОЯТ промышленных реакторов являются большая глубина выгорания и увеличение продолжительности выдержки ОЯТ перед переработкой. Повышение глубины выгорания от 0,5–1 до 40–50 ГВт сут/т U приводит к увеличению в десятки и сотни раз количества продуктов деления: Zr, Ru, Mo, Tc, редкоземельные элементы и трансурановых элементов: нептуния, плутония, америция, кюрия [2].

Извлечение в первом цикле в экстракт U, Pu, Tc, и Zr с последующим выделением в отдельные потоки Zr с частью Pu и Tc, Pu + Tc, Pu и U обуславливает уменьшение объёма ВАО, но усложняет структуру первого цикла вследствие увеличения числа экстракторов и усложнения внутрицикловых связей.

Все вышеперечисленные факторы привели к необходимости модификации технологии переработки ОЯТ. Разработана новая концепция водно-экстракционной технологии, которая предусматривает выделение и очистку не только Pu и U, но и Pu, Tc, Zr, Mo, а также фракционирование жидких отходов на ряд групп с отверждением каждой фракции наиболее оптимальным способом, учитывающим период полураспада радионуклидов, их радиоактивность и подвижность в геосфере [2].

Для этих целей осуществлена модификация PUREX-процесса, который включает экстракционную очистку, состоящую из трех экстракционных циклов – первого совместного и по одному в аффинажных циклах для урана и плутония.

Модификация первого цикла PUREX-процесса заключается:

- в максимально полном извлечении U, Pu, Pu, Zr и Tc в первом экстракционном аппарате [2];
- последовательном реэкстрагировании в отдельные потоки Zr, Pu, Pu, Tc, U с помощью селективного восстановления, окисления и комплексообразования [2].

На рис. 1.3 изображена детальная схема первого цикла модифицированного PUREX-процесса, а также схема фракционирования рафината первого цикла. Этот пример взят из проекта завода РТ-2 по переработке отработанного ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000 на площадке ФГУП «Горно-химический комбинат» [2].

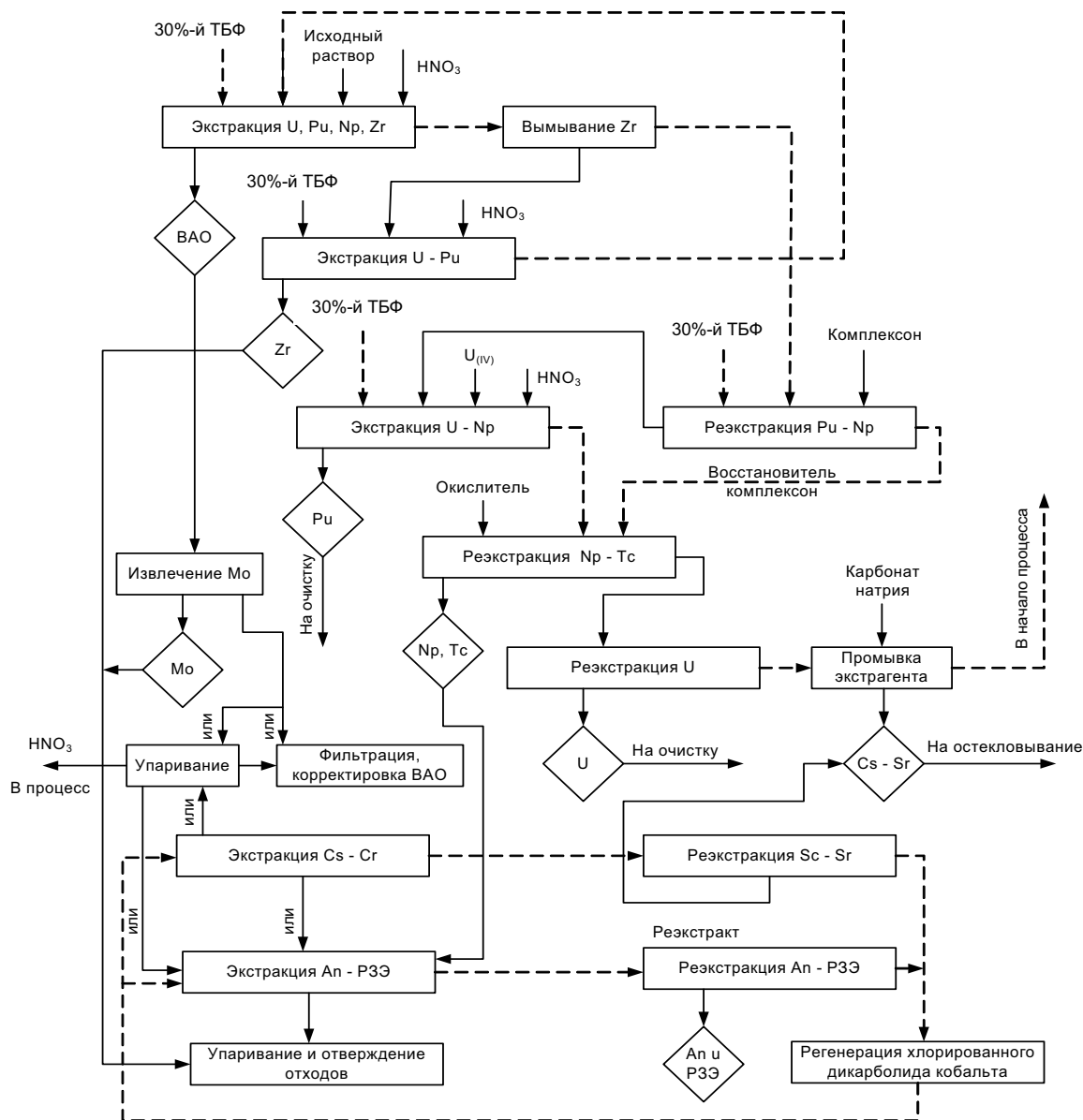


Рис. 1.3. Схема первого цикла завода РТ-2:

— водная фаза; - - - органическая фаза; \diamond продукт;
 \square технологическая операция

Практически все экстракционные технологические схемы переработки отработавшего ядерного топлива предусматривают применение в качестве экстрагента для извлечения целевых компонентов трибутилфосфата. Экстракционная система с трибутилфосфатом (ТБФ) может быть применена для переработки любых видов ТВЭЛов [6, 7].

Трибутилфосфат – три-н-бутиловый эфир ортофосфорной кислоты (C₄H₉O)₃PO.

ТБФ достаточно хорошо отвечает технологическим требованиям: малая растворимость в воде, отличная от воды плотность, высокая точка

кипения, устойчивость к радиации и химическим реагентам, легкая регенерируемость. К сожалению, он дорог и, кроме того, при переработке высокоактивных видов топлива, ТБФ под действием излучения, обусловленного высоким содержанием в растворе продуктов деления, плутония и трансплутониевых элементов, разлагается с образованием дибутилфосфорной кислоты, затем монобутилфосфорной кислоты и фосфорной кислоты. Дибутилфосфорная кислота образует с цирконием комплексы, частично реэкстрагирующиеся из органической фазы вместе с ураном и плутонием, что приводит к их загрязнению. Монобутилфосфорная кислота и фосфорная кислота взаимодействуют с цирконием с образованием труднорастворимых соединений, выпадающих в осадок на границе раздела фаз. В результате взаимодействия плутония с продуктами разложения ТБФ образуются труднореэкстрагируемые из органической фазы соединения, что ведет к потерям плутония. Эти недостатки можно преодолеть путем сокращения времени контакта фаз путем использования пульсационных колонн или центробежных экстракторов, введением эффективной системы очистки экстрагента и разбавителя от продуктов их радиолиза, введением агентов, образующих комплексы с цирконием, например фторид ионов, оптимизацией процесса экстракции путем подбора концентрации азотной кислоты, соотношения потоков органической и водной фаз, степени насыщения экстрагента ураном и т. п. [6, 7].

ТБФ используют с различными разбавителями в различных концентрациях. Концентрация ТБФ в растворе экстрагента определяется степенью обогащения перерабатываемого ядерного топлива. Для природного и низкообогащенного урана принята 30%-я концентрация. В случае переработки высокообогащенного по ^{235}U топлива или топлива с высоким содержанием плутония концентрацию ТБФ снижают до 2,5–5 %, чтобы избежать образования опасных концентраций делящихся нуклидов в экстракте. В качестве разбавителя используют керосин, очищенные углеводороды или четыреххлористый углерод [6, 7].

Процесс экстракционной очистки состоит из трех основных стадий: экстракции, промывок и реэкстракции. Коэффициенты очистки урана и плутония, потери ценных компонентов с водным раствором, образование межфазных осадков и их эмульгирование существенно зависят от степени насыщения экстрагента и кислотности питающего и промывочного растворов. Повышение степени насыщения экстрагента ураном способствует повышению коэффициентов очистки урана и плутония от осколочных элементов, оказывая на них вытесняющее действие.

Максимально возможная степень насыщения 30%-го раствора ТБФ (1,1 моль/л ТБФ) составляет 0,55 моль/л $\text{U}+\text{Pu}$, или около 130 г $\text{U}+\text{Pu}$ /л, так как эти металлы экстрагируются в форме соединений, имеющих фор-

мулу $MO_2(NO_3)_2(TBF)_2$, где $M - U(VI)$ и $Pu(VI)$, а также $M(NO_3)_4(TBF)_2$, где $M - Pu(IV)$. Содержание U и Pu в экстракте 1-го цикла составляет около 85 г U и $Pu/л$, что соответствует степени насыщения экстрагента, равной 65 %. Типичные коэффициенты очистки и их зависимости от концентрации урана в ТБФ приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Влияние степени насыщения ТБФ ураном на коэффициенты очистки от продуктов деления на первом цикле экстракции [6, 7]

Параметр	Насыщение 30 % ТБФ в керосине, %	
	40	85
Концентрация, г/л		
U	42.6	91.4
Pu	9.26	18.8
Коэффициент очистки		
^{137}Cs	3630	11400
^{144}Ce	100	33000
^{106}Ru	3.5	500
^{95}Zr	10	310

Повышение насыщения ТБФ ураном и плутонием значительно снижает экстрагируемость большинства продуктов деления, и в особенности церия, рутения и циркония. Увеличение кислотности водной фазы от 2 М до 3–4 М HNO_3 повышает растворимость в ней продуктов взаимодействия циркония с НТБФ и H_2TBF , а скорость их образования снижается. С помощью этих мер можно ограничить процесс образования межфазных осадков, главная часть которых – твердый продукт, содержащий цирконий и дибутилфосфат в отношении 1:2. Повышению коэффициента очистки от циркония, ниобия и рутения способствует также поведение сильноокислотных промывок органической фазы. Улучшение очистки от продуктов деления достигается также повышением температуры на отдельных стадиях процесса [6, 7].

Схема PUREX-процесса предусматривает очистку экстрагента от продуктов радиолиза. Традиционный способ очистки экстрагента от продуктов радиолиза и их соединений с продуктами деления заключается в промывке его водными растворами карбоната натрия, гидроокисью натрия или их смесью. Например, экстрагент промывают в 4-ступенчатом смесителе-отстойнике при 60 °С раствором Na_2CO_3 (0,1 М) и раствором $NaOH$ (0,1 М). Кроме смесителей-отстойников для регенерации экстрагента используют пульсационные и насадочные колонны. Химические

методы сводятся к образованию воднорастворимых солей дибутил-, монобутилфосфорной и фосфорной кислот с натрием. Недостатком метода является образование значительного количества соледержащих среднеактивных отходов, которые могут содержать и α -активные изотопы. Завод, производительностью 1500 т/год, ежегодно от операции промывки трибутилфосфата производит 150 т нитрата натрия, составляющего главную часть среднеактивных отходов. Остаточное количество плутония в трибутилфосфате после рекстракции щелочными растворами может полимеризоваться, выпасть в осадок, который может представлять опасность из-за достижения критической массы. Лучшие результаты дает промывка отработанного экстрагента водным раствором гидрата гидразина в области концентрации 0,1–1 М при температуре от 20 до 75 °С [6, 7].

1.5.1. Основные закономерности экстракции

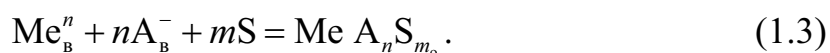
Экстракционную систему характеризует коэффициент распределения (α) исследуемого вещества между двумя фазами, определяемый как отношение равновесных концентраций вещества в органической и водной фазах [8].

Чем больше α , тем выше экстракционная способность экстрагента. Однако величина α в общем случае зависит не только от свойств экстрагента, но и от многих других факторов: концентрации распределяемого вещества в исходном водном растворе, наличия кислот и солей, природы разбавителя, состава экстрагируемого комплекса и т. п. [8].

Избирательность процесса экстракции при разделении данной пары элементов определяется величиной коэффициента разделения, равной отношению коэффициентов распределения.

Сейчас хорошо известно, что экстракция солей происходит в результате образования новых растворимых в органических растворителях соединений.

В простейшем случае реакцию экстракции можно записать в виде уравнения [8]:



Константа реакции:

$$K = \frac{[\text{Me A}_n\text{S}_m]_o}{[\text{Me}]_B} \cdot \frac{\gamma_o}{\gamma_{\pm}^{n+1} \cdot \gamma_s^m} \quad (1.4)$$

Тогда

$$\alpha = \frac{[\text{Me A}_n\text{S}_m]_o}{[\text{Me}]_B} = K \cdot [\text{A}]^n \cdot [\text{S}]^m \cdot \frac{\gamma_{\pm}^{n+1} \cdot \gamma_s^m}{\gamma_o} \quad (1.5)$$

где γ_o – коэффициент активности Me в органической фазе; γ_{\pm} – средний моляльный коэффициент активности соли; γ_s – коэффициент активности экстрагента.

При постоянстве концентрации аниона [A], экстрагента [S] и отношения коэффициентов активности, коэффициент распределения не зависит от концентрации экстрагируемой соли. Так, при экстракции нитрата церия из азотнокислых растворов растворами трибутилфосфата в четыреххлористом углероде коэффициент распределения остается практически постоянным при изменении концентрации от 10^{-11} до 10^{-1} г/мл [8].

Во многих других случаях коэффициент распределения сильно зависит от концентрации. При больших концентрациях извлекаемого элемента в водном растворе коэффициент распределения может уменьшаться благодаря насыщению органической фазы. Уменьшение коэффициента распределения с ростом концентрации экстрагируемого вещества может вызываться и образованием его полимеров в водной фазе [8].

Состав растворов также существенно влияет на коэффициент распределения, который зависит от природы и концентрации всех веществ, участвующих в образовании экстрагируемого соединения. Так, коэффициент распределения возрастает с увеличением концентрации аниона (A), вводимого в раствор в форме неэкстрагируемой соли или кислоты. Добавление в водный раствор таких солей и кислот, называемых высаливателями, является удобным практическим приемом увеличения коэффициента распределения [8].

Значительное влияние на коэффициенты распределения оказывает и концентрация водородных ионов в водных растворах. При экстракции кислородсодержащими органическими растворителями это влияние обусловлено участием ионов водорода в образовании экстрагируемого соединения, а также связыванием части экстрагента в соединение с кислотой. Изменение кислотности водного раствора может менять и равновесную концентрацию анионов, входящих в состав экстрагируемой соли, в случае анионов слабых кислот. Влияние кислотности раствора на коэффициенты распределения особенно существенно при экстракции внутрикомплексных соединений. Эту зависимость широко используют для разделения элементов и при исследовании гидролиза солей. В последнем случае предполагается, что продукты гидролиза не переходят в органическую фазу [8].

Помимо перечисленных факторов, практическое значение имеет и присутствие в водном растворе посторонних ионов, не входящих в состав экстрагируемого соединения, но способных, например, участвовать в образовании комплексных соединений с катионом экстрагируемого металла. Эффективность влияния этих посторонних ионов определяется

константами устойчивости соответствующих комплексных соединений. Это обстоятельство часто используют в экстракционных процессах для разделения элементов путем связывания элемента, от которого необходимо освободиться, в неэкстрагируемое комплексное соединение [8].

Поскольку экстракция – это, прежде всего, процесс образования соединения извлекаемого элемента с экстрагентом, то совершенно естественно, что на коэффициент распределения решающее влияние оказывает химическая природа экстрагента (рис. 1.4), т. е. строение его молекул, наличие электронодонорных и других функциональных групп [8].

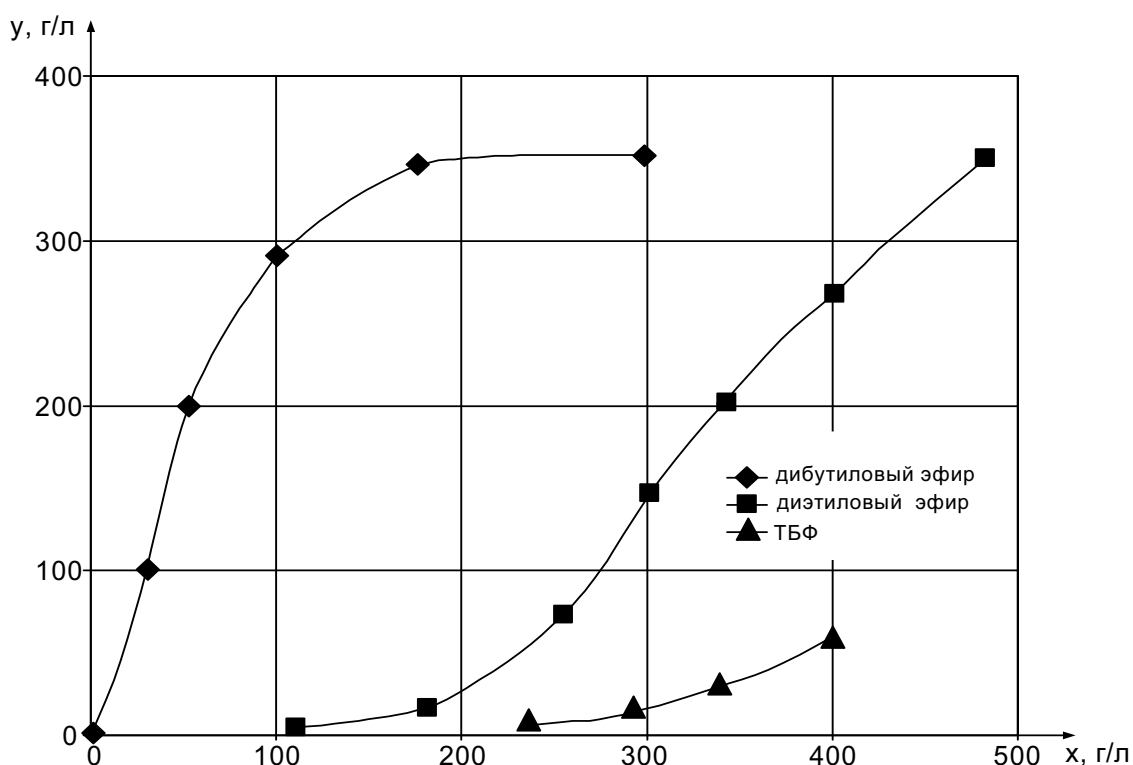


Рис. 1.4. Характерные участки кривых распределения:
 y и x – концентрации нитрата урана в органической и водной фазах

Влияние концентрации азотной кислоты на коэффициент распределения отражено на рис. 1.5.

Азотная кислота поставляет ионы нитрата для высаливания урана и плутония в органическую фазу в экстракторах. Для рекстракции урана и плутония в водной фазе должна быть небольшая концентрация нитрат-иона. При увеличении концентрации азотной кислоты в водной фазе до 5 М коэффициент распределения урана возрастает, особенно сильно для разбавленных по урану растворов. При кислотности выше 5 М по азотной кислоте дальнейшее увеличение концентрации кислоты снижает коэффициент распределения урана, так как образование комплекса ТБФ с азотной кислотой резко уменьшает концентрацию свободного ТБФ.

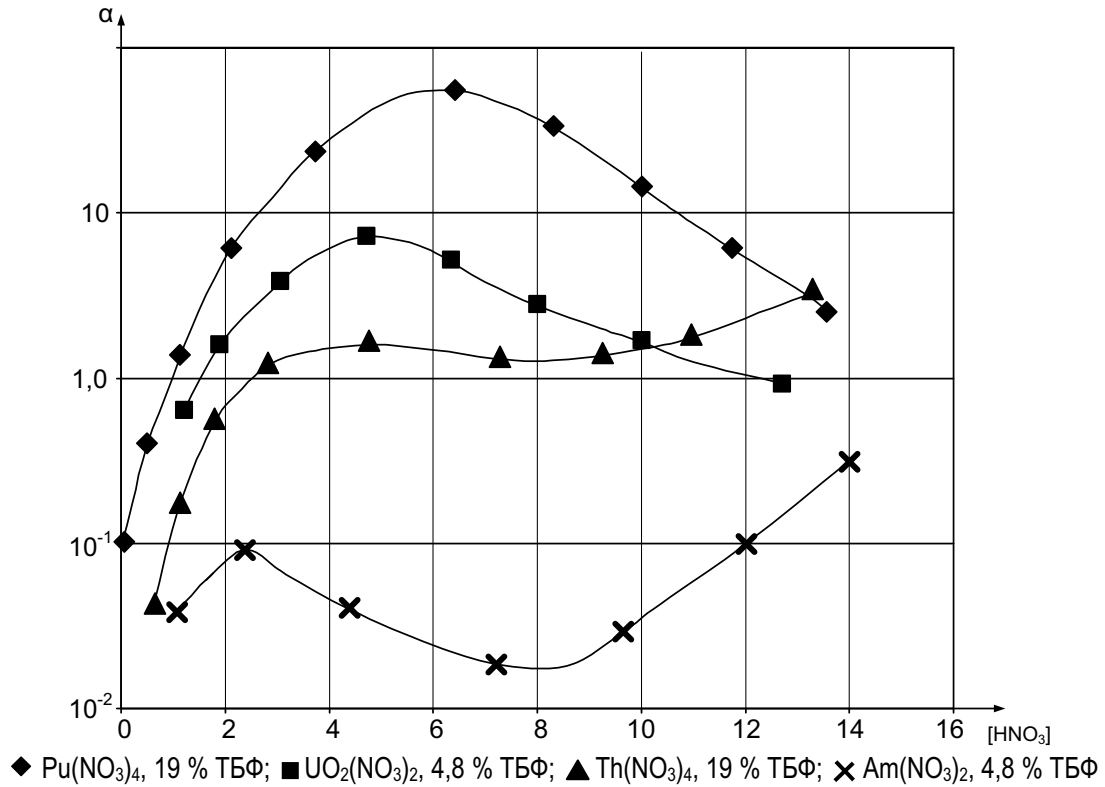


Рис. 1.5. Зависимость коэффициента распределения $\text{U}(\text{VI})$, $\text{Th}(\text{IV})$, $\text{Pu}(\text{IV})$, $\text{Am}(\text{III})$ от концентрации HNO_3 в водной фазе (при 25 °С, разбавитель – керосин)

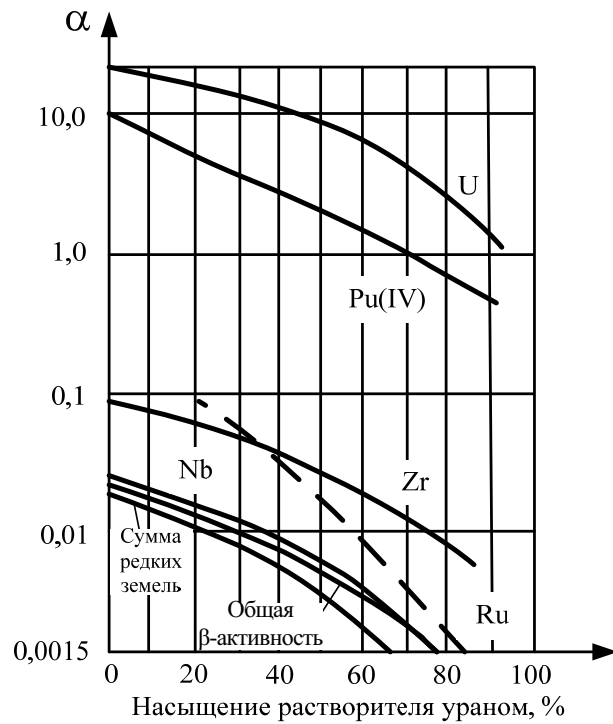


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента распределения урана и продуктов деления от насыщения органической фазы ураном

Главный вывод из анализа (рис. 1.6): чем выше насыщение органической фазы ураном, тем выше коэффициент очистки от продуктов деления.

1.5.2. Урановая ветвь

Уран и плутоний, разделенные после 1-го цикла экстракции, подвергают дальнейшей очистке от продуктов деления, нептуния и друг от друга до уровня, отвечающего техническим условиям ЯТЦ, и затем превращают в товарную форму.

Наилучших результатов по дальнейшей очистке урана достигают комбинированием разных методов, например экстракции и ионного обмена. Однако в промышленном масштабе экономичнее и технически проще использовать повторение циклов экстракции с одним и тем же растворителем – трибутилфосфатом. Число циклов экстракции и глубина очистки урана определяются типом и выгоранием ядерного топлива, поступающего на переработку, и задачей отделения нептуния. Для удовлетворения технических условий по содержанию примесных α -излучателей в уране общий коэффициент очистки от нептуния должен быть ≥ 500 . Схема очистки в урановой ветви включает или цикл экстракции 30 %-м раствором ТБФ в инертном разбавителе и сорбцию на силикагеле, или два цикла экстракции ТБФ [6, 7].

Возможны два варианта проведения экстракционных циклов в урановой ветви: с межцикловым упариванием, так как при этом на 30 % сокращается общий объем растворов в экстракционной колонне и достигается более высокое насыщение экстрагента ураном (95 гУ/л). Это должно способствовать очистке от рутения, циркония и ниобия. Упаривание реэкстракта урана при низкой концентрации азотной кислоты ($\leq 0,3$ М) создает условия для образования неэкстрагируемых гидролизных форм циркония [6, 7].

После первого цикла уран реэкстрагируется в водный раствор и проводится второй цикл очистки при более высоком насыщении экстрагента ураном (до 92–96 %) и низкой кислотности. В этих условиях повышается очистка от нептуния, а также америция и кюрия, которые попадают преимущественно в водные сбросные растворы. Для улучшения очистки от плутония и нептуния добавляют азотную кислоту (предпочтительно в виде газообразной двуокиси азота) или другой восстановитель. Проведение двух циклов экстракционной очистки урана раствором трибутилфосфата в четыреххлористом углероде обеспечивает отделение нептуния от урана на 99 %; плутония от урана – на 97–98 %. Коэффициент очистки урана от циркония составляет $2 \cdot 10^3$, от рутения – $5 \cdot 10^3$, от редкоземельных элементов – более 10^4 , от технеция – 2 [6, 7].

Окончательную очистку урана от продуктов деления, главным образом от циркония, проводят с помощью сорбции в колонне с силикагелем. Для этого органическую фазу после второго цикла очистки урана подают в сорбционную колонну, в верхней части которой собираются все нерастворимые примеси, так как колонна работает одновременно и как фильтр. Обычно на пути органического раствора ставят несколько попеременно действующих колонн с силикагелем, с тем чтобы, не прерывая процесса, проводить отмывку колонн от сорбированных β - и γ -активных веществ. Десорбирующим раствором служит щавелевая кислота, хорошо смывающая цирконий и ниобий. Уран после сорбционной очистки реэкстрагируют в водный раствор, который анализируют на чистоту, содержание урана и степень обогащения по ^{235}U [6, 7].

Завершающая стадия аффинажа урана предназначается для перевода его в оксиды урана. Превращение водных растворов уранилнитрата в окислы возможно либо осаждением в виде перекиси уранила, оксалата уранила, уранилкарбоната аммония или ураната аммония с последующим их прокаливанием, либо прямым термическим разложением гексагидрата уранилнитрата [6, 7].

Свойства двуокиси урана зависят от методов ее получения, а такие свойства, как структура, отношение О/У, удельная поверхность и активность порошков, являются решающими при использовании UO_2 для изготовления твэлов для ядерных реакторов. Денитрацию растворов уранилнитрата проводят в две стадии: упаривание раствора уранилнитрата с получением гексагидрата уранилнитрата и термическая обработка при 300–500 °С упаренного на 70–100 % продукта до трехокиси урана [6, 7].

1.5.3. Плутониевая ветвь

Плутоний после отделения от основной массы урана подвергают дальнейшей очистке от продуктов деления, урана и других актиноидов до собственного фона по γ - и β -активности. В качестве конечного продукта на заводах стремятся получать двуокись плутония, а в дальнейшем в комплексе с химической переработкой планируется осуществлять и производство твэлов, что позволит избежать дорогостоящих перевозок плутония, требующих особых предосторожностей, особенно при перевозке растворов нитрата плутония. Все стадии технологического процесса очистки и концентрирования плутония требуют особой надежности систем обеспечения ядерной безопасности, а также защиты персонала и предотвращения возможности загрязнения окружающей среды ввиду токсичности плутония и высокого уровня α -излучения. При разработке оборудования учитывают все факторы, которые могут вызвать возникновение критичности: массу делящегося материала, гомогенность, геометрию, отражение нейтронов, замедление и поглощение нейтронов, а также

концентрацию делящегося вещества в данном процессе и др. Минимальная критическая масса водного раствора нитрата плутония равна 510 г (при наличии водяного отражателя). Ядерная безопасность при осуществлении операций в плутониевой ветви обеспечивается главным образом специальной геометрией аппаратов (их диаметр и объём) и ограничением концентрации плутония в растворе, которая постоянно контролируется в определенных точках непрерывного процесса [6, 7].

Технология окончательной очистки и концентрирования плутония основывается на проведении последовательных циклов экстракции или ионного обмена и дополнительной аффинажной операции осаждения плутония с последующим термическим превращением его в двуокись. Завершающая стадия плутониевой ветви – денитрация растворов плутония, осуществляемая осаждением оксалатов или термической денитрацией.

Первый цикл экстракции в плутониевой ветви проводят с использованием в качестве экстрагента 30%-го ТБФ в инертном разбавителе, керосине или *n*-додекане. Плутоний в реэкстракте после отделения от урана находится в трехвалентном состоянии, поэтому перед проведением следующего цикла экстракции его окисляют либо нитритом натрия, либо газообразными окислами азота, пропуская их противотоком в насадочной абсорбционной колонне, либо электрохимически. Методы окисления нитритом натрия и газообразными окислами азота несовершенны: применение нитрита натрия приводит к образованию соледержащих среднеактивных отходов, а применение окислов азота требует тщательной очистки как раствора плутония от нитрозных газов, которые в дальнейших операциях приводят к потерям плутония, так и отходящих газов при самой реакции окисления. Непрерывный процесс анодного окисления лишен указанных недостатков [6, 7].

Водный раствор окисленного плутония поступает на экстракционный цикл, осуществляемый в трех экстракционных блоках: в первом идет экстракция плутония трибутилфосфатом и промывка, во втором – восстановительная реэкстракция плутония, в третьем – промывка плутониевого водного раствора трибутилфосфатом. В качестве восстановителя используют нитрат U(IV), нитрат гидразина или нитрат гидроксиламина. Очистку плутония от нептуния можно улучшить добавлением азотистой кислоты [6, 7].

Водный раствор плутония после первого цикла очистки в плутониевой ветви снова окисляют и подают на следующий цикл экстракции, который проводят идентично предыдущему. Обычно технологическая схема включает операцию упаривания водного раствора нитрата плутония для его концентрирования. Упаривание слабокислых растворов плутония обуславливает его необратимую полимеризацию и отложение

продуктов на стенках выпарного аппарата, что приводит к частым остановкам процесса. Операция упаривания раствора плутония требует предосторожности с точки зрения ядерной безопасности и коррозии аппаратуры. Избежать этих осложнений можно, используя безупрочный вариант экстракционной очистки и концентрирования плутония, так называемый рефлекс-процесс [6, 7].

Процесс осуществляют в двухколоночном экстракционном цикле. В среднюю часть первой колонны подают исходный раствор плутония, подлежащий очистке и концентрированию. Снизу колонны поступает раствор ТБФ, сверху – водный промывной раствор. Промытый органический экстракт затем поступает во вторую колонну, где плутоний реэкстрагируется в водный раствор. Небольшую долю этого водного экстракта выводят из процесса как плутониевый продукт. Остальную же часть возвращают в процесс, смешивая с водным промывным раствором, поступающим в первую колонну сверху. При достижении динамического равновесия концентрация плутония в водном растворе, выходящем из второй колонны, в десятки раз больше, чем она была в простом традиционном цикле без возврата. Применение рефлекс-технологии повышает эффективность очистки плутония от продуктов деления и позволяет без упаривания получить концентрированные растворы плутония (40–50 г/л), пригодные для осуществления оксалатного осаждения плутония. В результате двух циклов экстракции с использованием 30%-го раствора ТБФ с CCl_4 в плутониевой ветви достигается очистка от циркония в 2000 раз, от рутения – в 10000 раз, от РЗЭ – в 50000 раз. Для получения достаточной очистки плутония при переработке глубоковыгоревшего топлива добавляют еще один – третий – экстракционный цикл в ветви плутония (экстрагент – третичные амины) [6, 7].

Эффективным методом концентрирования плутония является ионный обмен, т. к. кроме концентрирования плутония он обеспечивает дополнительную очистку продукта. Для этого используют сильноосновные аниониты (Дауэкс-1, А-17). Однако радиационная стойкость ионообменных смол позволяет использовать их лишь в условиях, когда интегральная доза облучения не превышает 100 Мрад [6, 7].

Двуокись плутония получают осаждением пероксида Pu(III) или оксалата Pu(III) и Pu(IV) с последующим прокаливанием этих соединений. Оксалатное осаждение – наиболее распространенный способ денитрации плутония. Для типового перерабатывающего завода мощностью около 1500 т/год установка отверждения плутония должна быть рассчитана на получение 15 т плутония в год. Удельная поверхность порошка PuO_2 сильно зависит от удельной поверхности осадка оксалата плутония, поэтому при осаждении оксалата контролируют кислотность исходного раствора, концентрацию щавелевой кислоты и скорость ее

добавления, скорость перемешивания, валентность плутония, продолжительность и температуру процесса осаждения [6, 7].

Осаждение оксалата Pu(IV) осуществляется добавлением в раствор $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ щавелевой кислоты при температуре 50–60 °С. Кислотность раствора и валентности плутония корректируют добавлением азотной кислоты, воды и перекиси водорода к исходному раствору. Образовавшийся оксалат плутония промывают и фильтруют на вращающихся вакуумных фильтрах. Маточные растворы, в которых содержится плутоний, концентрируют и возвращают в цикл, в аппарат корректировки. Суспензию оксалата плутония $[\text{Pu}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ с фильтра направляют на сушку и прокаливание. Прокаливание осуществляют при температуре 300–400 °С в шнековой печи, имеющей ядерно безопасные размеры [6, 7].

На физические характеристики порошка PuO_2 влияют условия прокаливания: толщина слоя осадка в реакторе, время, температура и атмосфера прокаливания. Повышение температуры прокаливания способствует увеличению удельной поверхности порошка и снижению его химической активности. Оптимальной температурой прокаливания считают 750 °С, при этом удельная поверхность возрастает до 25–35 м²/г [6, 7].

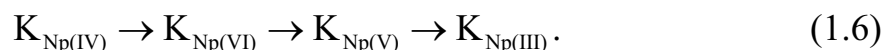
Двуокись плутония поступает в установку кондиционирования, где ее подвергают прокаливанию, дроблению, просеиванию, комплектованию партий и упаковке.

Для изготовления смешанного уран-плутониевого топлива целесообразен метод химического соосаждения урана и плутония, позволяющий достичь полной гомогенности топлива. Такой процесс не требует разделения урана и плутония при переработке отработавшего топлива. В этом случае смешанные растворы получают при частичном разделении урана и плутония вытеснительной рекстракций. Таким способом можно получить $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ для легководных ядерных реакторов на тепловых нейтронах с содержанием PuO_2 около 3 %, а также для реакторов на быстрых нейтронах с содержанием PuO_2 примерно 20 % [6, 7].

1.5.4. Выделение и очистка нептуния

Значение, которое имеет ^{237}Np как исходный материал для получения ^{238}Pu . Он широко используется в космической технике, в малой энергетике и в медицине, а также обуславливает необходимость извлечения нептуния при переработке выгоревшего ядерного топлива. В выгоревшем окисном топливе легководных реакторов содержится 230–430 г/т ^{237}Np . В окислительно-восстановительных циклах процесса нептуний ведет себя иначе, чем уран и плутоний, из-за существенного различия стойкости этих элементов в одинаковых окислительных состояниях [6, 7].

В исходном растворе топлива нептуний присутствует в четырех-, пяти- и шестивалентном состоянии. Экстрагируемость трибутилфосфатом для различных валентных форм имеет следующую последовательность [6, 7]:



В первом цикле совместной очистки урана и плутония от продуктов деления нептуний распределяется так, что основная часть его попадает в поток с ураном, а затем в урановой ветви – в водный рафинат. В условиях экстракционной технологии, где возможно применение только быстропротекающих реакций и нежелательно введение новых реагентов, процессы окисления и восстановления нептуния должны быть проведены без значительного нарушения основного процесса разделения и очистки урана и плутония. Окислительно-восстановительный агент, оптимально отвечающий этим требованиям, – азотистая кислота. При ее использовании окислительное состояние нептуния и его поведение в экстракционных циклах определяет отношение $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ [6, 7].

Существуют два варианта извлечения нептуния в процессе переработки [6, 7].

Первый вариант – нептуний полностью экстрагируется в первом цикле совместно с ураном и плутонием и затем отделяется в рафинаты в циклах экстракционной очистки урана и (или) плутония. В этом варианте используют рефлекс-процесс, т. е. закливание нептуния в целях его накопления и концентрирования в экстракционном цикле с последующим его выводом. Прежде всего, нептуний переводят в экстрагируемое ТБФ шестивалентное состояние добавлением азотистой кислоты в экстракционно-промывной блок (колонну) первого цикла и повышением концентрации азотной кислоты до 3–4 М. Азотистая кислота служит автокатализатором окисления Np(V) азотистой кислотой при достаточно высокой концентрации последней. Нептуний, вместе с ураном и плутонием, переходит в органическую фазу. Затем в эту фазу добавляют гидразин, переводящий нептуний из шести- в пятивалентное состояние, и проводят реэкстракцию. Нептуний переходит в водную фазу. Очищенный раствор нептуния поступает на осаждение оксалата, которое проводят при 50 °С из 1–4 М HNO_3 в присутствии аскорбиновой кислоты и гидразина, стабилизирующих нептуний в четырехвалентном состоянии. Высушенный на воздухе оксалат нептуния прокаливают, постепенно повышая температуру от 150 до 550 °С. Конечный продукт – двуокись нептуния. Конечным продуктом технологической схемы выделения нептуния может являться также очищенный, сконцентрированный упариванием раствор нитрата нептуния.

Второй вариант – нептуний в первом цикле выводят полностью в высокоактивный рафинат, из которого его затем извлекают экстракционным методом. В ходе процесса добавляют в питающий и промывные растворы избыток нитрита натрия, стабилизирующего нептуний в пятивалентном состоянии. В результате до 95 % нептуния остается в водных высокоактивных отходах.

1.6. Аппаратурное оформление радиохимических производств

По способу контакта фаз промышленные экстракторы подразделяют на дифференциально-контактные (колонные аппараты), ступенчатые и промежуточные конструкции [2, 3, 5, 9]. Аппараты первой группы отличаются непрерывным контактом фаз и плавным изменением концентрации извлекаемого компонента вдоль длины (высоты) аппарата. При таком профиле концентраций фазы ни в одной точке экстрактора не приходят в равновесие. Эти аппараты более компактны и требуют ограниченных производственных площадей, однако в них за счет продольного перемешивания (обусловлено конвективными осевыми потоками, застойными зонами, турбулентными пульсациями и т. д.) может значительно уменьшаться средняя движущая сила.

Аппараты второй группы состоят из дискретных ступеней, в каждой из которых осуществляется контакт фаз, после чего они разделяются и движутся противотоком в последующие ступени. Продольное перемешивание выражено слабее, но необходимость разделения фаз между соседними ступенями может приводить (при плохо отстаивающихся системах) к существенному увеличению размеров экстрактора.

1.6.1. Колонные экстракторы

Данный вид экстракторов подразделяют на гравитационные экстракторы и экстракторы с внешним подводом энергии. Эффективность колонн оценивают по КПД отдельных ступеней разделения, высоте, эквивалентной теоретической ступени (ВЭТС), либо высоте единицы переноса (ВЕП). ВЭТС зависит от гидродинамического режима в колонне и физико-химических свойств экстракционной системы. Высоту (длину) колонны, в которой проводится многоступенчатый процесс, рассчитывают по формуле

$$H = N \cdot \text{ВЭТС}(\text{ВЭП}), \quad (1.7)$$

где N – необходимое число ступеней, определяемое, как правило, графически по изотермам экстракции и материальным балансам или с помощью расчетов на ЭВМ.

Гравитационные экстракторы. В них движение взаимодействующих жидкостей происходит под действием разности плотностей фаз;

поверхность их контакта образуется за счет собственной энергии потоков. К этим аппаратам относятся распылительные, насадочные и ситчатые экстракторы.

Распылительные экстракторы (рис. 1.7) – полые колонны, снабженные соплами, инжекторами и другими распылителями для диспергирования взаимодействующих фаз. Такие аппараты отличаются простотой и высокой производительностью, но сравнительно невысокой эффективностью. Несколько более эффективны, но менее производительны насадочные экстракторы, не отличающиеся по устройству от других подобных массообменных аппаратов.

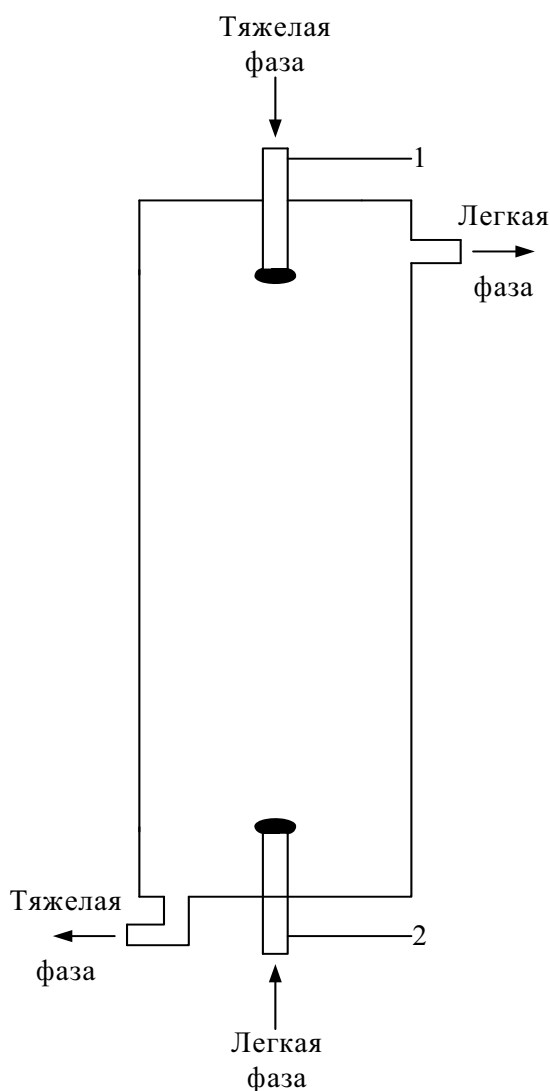


Рис. 1.7. Распылительный экстрактор:
1, 2 – распылители

Ситчатые экстракторы представляют собой колонны с перфорированными тарелками, снабженными переливными устройствами. Одна из взаимодействующих жидкостей, проходя через отверстия тарелок,

диспергируется; благодаря этому создается большая поверхность контакта с встречной жидкостью, протекающей по переливным устройствам в виде сплошной фазы. Ситчатые экстракторы уступают по производительности только распылительным экстракторам, надежны в работе (вследствие простоты конструкции и отсутствия движущихся частей), однако имеют низкую эффективность.

По сравнению с другими колонными аппаратами все гравитационные экстракторы малоэффективны (ВЭТС может достигать 3 м) из-за относительно небольшой площади удельной поверхности контакта фаз, обусловленной крупными размерами капель (до нескольких миллиметров). Подвод энергии позволяет раздробить капли (до десятых долей миллиметра), в результате чего требуемую высоту колонны можно уменьшить на порядок.

Экстракторы с внешним подводом энергии подразделяются на пульсационные, вибрационные и экстракторы с механическим перемешиванием. К аппаратам последнего типа относятся экстракторы роторно-дисковые и с чередующимися смесительными и отстойными насадочными секциями (колонны Шайбеля). В роторно-дисковых аппаратах (рис. 1.8) вращающиеся диски перемешивают и диспергируют контактирующие жидкости, после чего они расслаиваются. В колоннах Шайбеля (рис. 1.9) лопастные или турбинные мешалки размещены на общем вертикальном валу попеременно со слоями неподвижной насадки. Перемешанные жидкости, пройдя через слой насадки, расслаиваются.

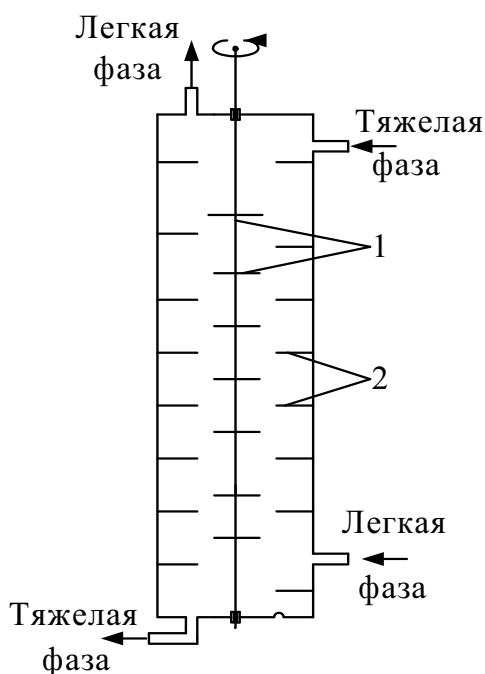
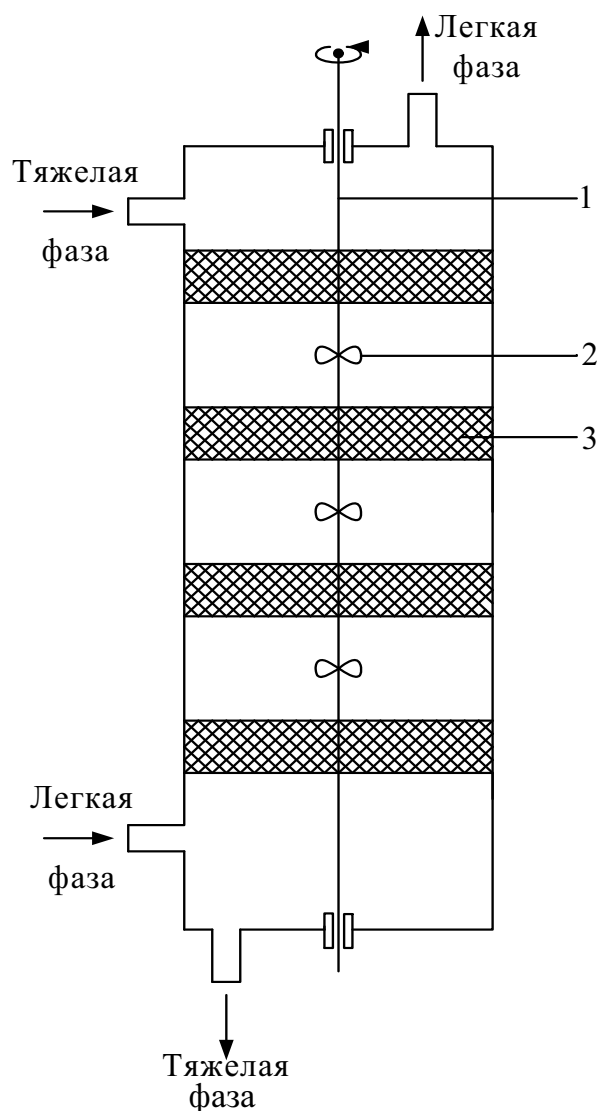
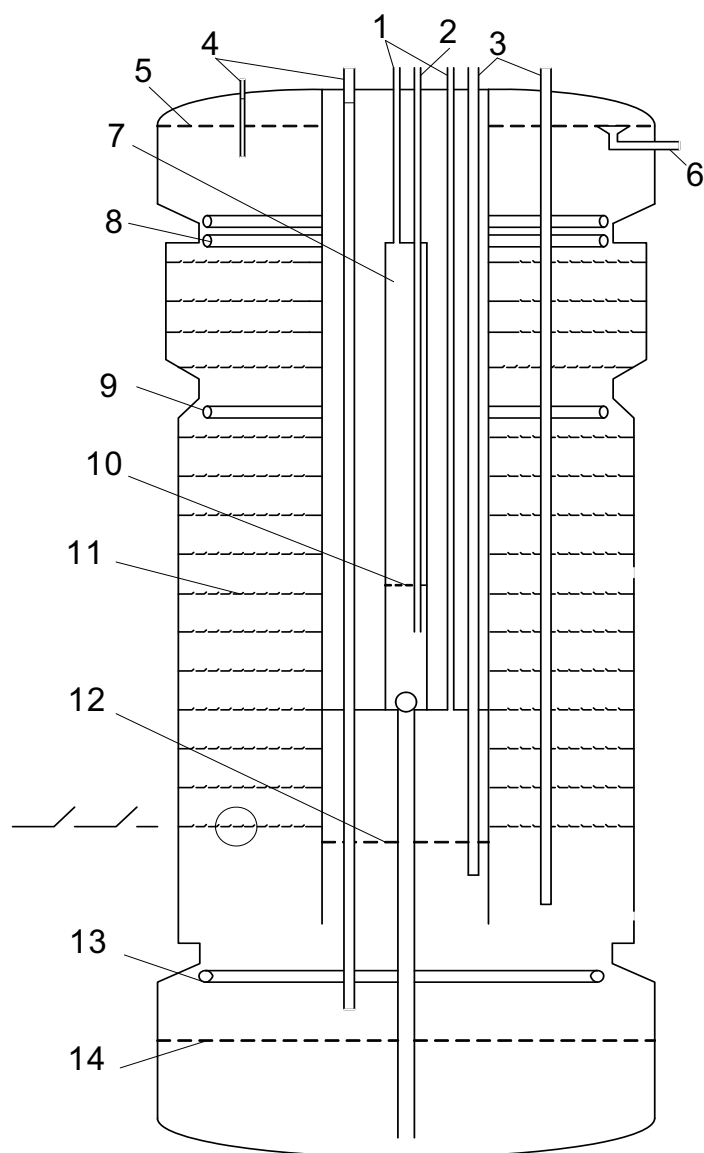


Рис. 1.8. Роторно-дисковый экстрактор:
1 – ротор (вал с дисками); 2 – кольцевые перегородки статора



*Рис. 1.9. Экстрактор с чередующимися смесительными и отстойными секциями (колонна Шайбеля):
1 – вал; 2 – мешалка; 3 – насадка*

Наибольшее распространение среди колонных экстракторов получили тарельчатые пульсационные колонны. Пульсационная колонна состоит из реакционной зоны и вспомогательных частей (рис. 1.10). Первая представляет собой цилиндрический корпус с расположенными внутри тарелками. В нижней части колонны имеется специальная камера – пульсационная (пульс-камера), которая через пульсопровод соединена с источником передачи импульса пульсации в колонну – пульсатором. Пульсация жидкости в колонне дополнительно дробит капли дисперсной фазы, увеличивая площадь межфазного взаимодействия, и тем самым улучшая процесс экстракции. Водная фаза поступает сверху в колонны, а органическая фаза – снизу [2, 3, 5, 9].



*Рис. 1.10. Упрощенная схема пульсационной тарельчатой колонны:
 1 – пульсопровод; 2 – выходной трубопровод встроенного пневматического
 пульс-насоса; 3, 4 – карманы для датчиков контрольно-измерительных приборов;
 5, 10, 12, 14 – уровни жидкости и граница раздела фаз; 6 – сливная воронка;
 7 – встроенный пульс-насос; 8, 9, 13 – распределительные кольца
 для водных и органических фаз; 11 – тарелки*

1.6.2. Ступенчатые экстракторы

К ним относятся различные типы смесителей-отстойников. Секция такого аппарата по эффективности приближается к одной теоретической ступени. Требуемого числа ступеней достигают соединением секций в каскад. Зачастую несколько секций, разделенных перегородками, объединяют в одном корпусе (ящичные экстракторы, рис. 1.11). Каждая

секция (ступень) имеет смесительную и отстойную камеры. Перемешивание фаз может быть пульсационным или механическим (чаще всего применяют турбинные мешалки, одновременно транспортирующие жидкости из ступени в ступень).

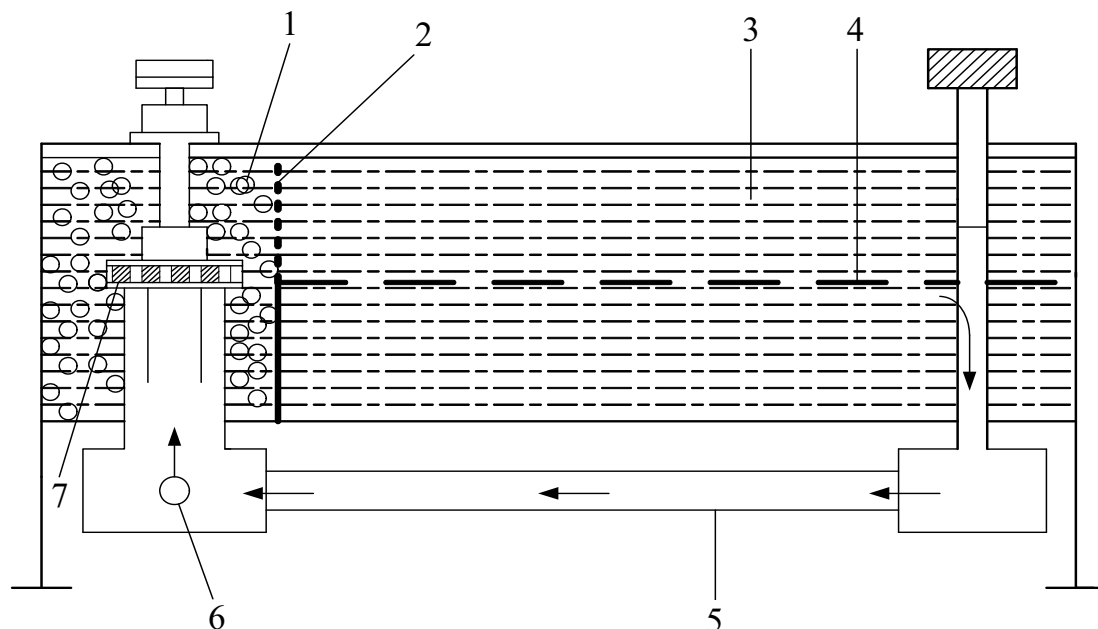


Рис. 1.11. Ящичный экстрактор:

1, 3 – смесительная и отстойная камеры; 2 – перегородка; 4 – граница раздела фаз; 5 – рециркуляционная труба; 6 – всасывающий коллектор; 7 – турбинная мешалка

Достоинства смесителей-отстойников:

- 1) возможность варьирования нагрузок в широких пределах;
- 2) возможность быстрого достижения требуемой производительности после остановки процесса;
- 3) возможность формирования каскадов из большого числа ступеней;
- 4) простота эксплуатации.

Недостатки:

- 1) большие объемы перерабатываемых в аппаратах растворов и опасность возникновения пожаров;
- 2) медленное установление равновесия;
- 3) большое число механических и пневматических устройств;
- 4) повышенная чувствительность к твердым загрязнениям, что снижает надежность работы;
- 5) высокая металлоемкость.

Смесители-отстойники имеют преимущества перед колонными экстракторами в процессах с малым или очень большим числом ступеней, а также в процессах с большими потоками (до 1000 м³/ч).

1.6.3. Экстракторы промежуточных конструкций (центробежные экстракторы)

Среди аппаратов, занимающих промежуточное положение между дифференциально-контактными и ступенчатыми, наиболее распространены центробежные экстракторы, в которых разделение, а иногда и перемешивание фаз, происходят в поле действия центробежных сил. Рабочий орган (ротор) этих аппаратов состоит из набора перфорированных с обоих концов цилиндров, спиральных лент и др. Исходный раствор и экстрагент движутся навстречу друг другу, причем более тяжелая фаза – от центра к периферии, а более легкая – в обратном направлении. Контакт жидкостей происходит на пути их движения, а диспергирование – при прохождении через перфорированные части цилиндров [2, 3, 5, 9].

Центробежные экстракторы подразделяют на камерные (дискретно-ступенчатые) и дифференциально-контактные. Аппараты первой группы состоят из отдельных ступеней (камер), в каждой из которых движущиеся противотоком фазы последовательно перемешиваются и разделяются (например, экстракторы «Лувеста» и «Робатель»). В аппаратах второй группы процесс протекает при близком к непрерывному контакту движущихся встречных потоков фаз; движение происходит по каналам, образованным внутренними перегородками ротора (например, экстракторы «Подбильняка»).

Примерная структурная схема центробежного экстрактора представлена на рис. 1.12.

Центробежные экстракторы отличаются: высокой производительностью (потоки до сотен м³/ч) и эффективностью (3–10 теоретических ступеней), малой продолжительностью контакта фаз (несколько секунд и менее), интенсивным массообменом. Такие аппараты перспективны в производствах неустойчивых соединений (например, антибиотики), при переработке высокорadioактивных растворов и стойких эмульсий, систем с близкими плотностями фаз.

Выбор экстракторов оптимальных конструкций для конкретных промышленных процессов должен базироваться на технико-экономическом сравнении аппаратов с учетом эффективности их работы, производительности, разделительной способности, а также энергетических, капитальных и эксплуатационных затрат.

В лабораторной практике применяют в основном те же, что и в промышленности, способы жидкостной экстракции, проводимой в стеклянных, металлических или полимерных экстракторах разнообразных конструкций, простейшие из которых – делительные воронки, прибор Льюиса (химический стакан с мешалками) и др.

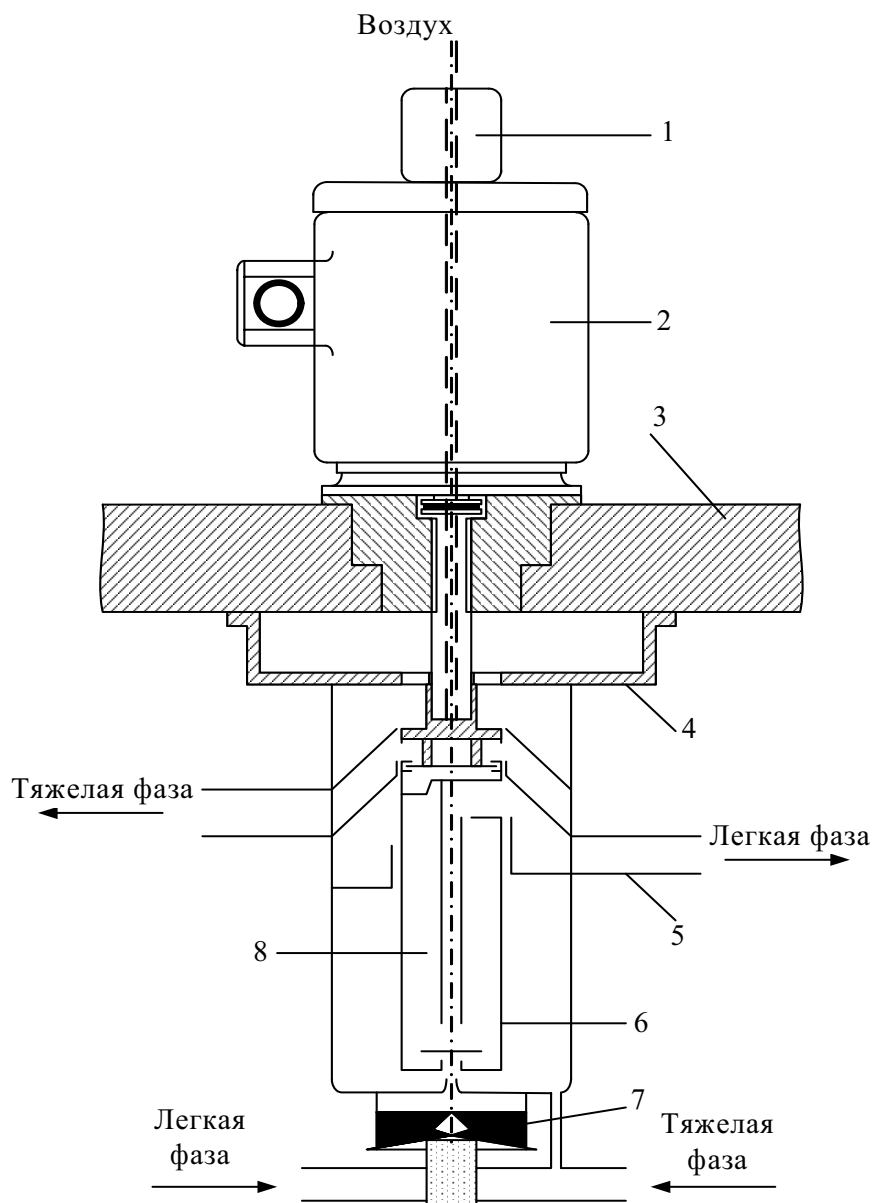


Рис. 1.12. Схема центробежного экстрактора:

*1 – контактное уплотнительное кольцо; 2 – двигатель; 3 – кольцо; 3 – защита;
4 – подвесная рама; 5 – приемный канал; 6 – ротор; 7 – мешалка;
8 – зона раздела фаз*

В заключение следует отметить, что при разработке математических моделей экстракционных процессов необходимо учитывать рассмотренные выше особенности экстракции металлов (U, Pu, Np, Zr, Am) раствором ТБФ:

- зависимость коэффициента распределения металла от свойств органической фазы (количественного состава ТБФ и разбавителя);
- зависимость коэффициента распределения металла от концентрации «высаливателя» – азотной кислоты;

- зависимость насыщения органической фазы металлом и осколками деления от концентрации металла в водной фазе;
- температурные зависимости.

Кроме этого, следует отметить, что существует много общего при построении математических моделей ящичных, колонных и центробежных экстракторов, так как в их основе лежит процесс жидкостной экстракции металла. Отличием является способ разделения водных и органических фаз. В ящичных экстракторах происходит статическая экстракция, в колонных и центробежных – динамическая экстракция. В колонных экстракторах потоки органической и водной фазы перемещаются за счет разности плотностей, а в центробежных – за счет различных центробежных сил.

Следует также отметить, что непосредственное исследование технологического процесса переработки облученного ядерного топлива затруднено вследствие больших уровней радиации и химической активности перерабатываемого топлива. Поэтому для выполнения исследований технологического процесса экстракции металла как объекта управления в целях синтеза САУ необходима математическая модель этого процесса.

2. АНАЛИЗ УСТАНОВКИ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Установка «Утес» радиохимического завода Сибирского химического комбината

В качестве примера установки по переработке облученного ядерного топлива рассмотрим установку «Утес» радиохимического завода СХК.

Установка «Утес» РХЗ СХК представляет собой уникальную установку для переработки облученного ядерного топлива по экстракционной технологии [4, 10, 11], она включает: 5 экстракционных тарельчатых пульсационных колонн (ЭК); два демпфера (ДМ); два сепаратора (СП) и шесть пневматических пульсационных насосов (ПН).

Упрощенная технологическая схема экстракционного каскада [4, 10] представлена на рис. 2.1, а в табл. 2.1 – расшифровка введенных обозначений для работы в первом цикле экстракционной очистки.

Головная экстракционная колонна ЭК1 (рис. 1.10) предназначена для экстракции урана и плутония и вымывания из органической фазы продуктов деления нисходящим потоком азотнокислого водного раствора. В колонне ЭК2 происходит дальнейшая промывка экстракта для удаления высокоактивных продуктов деления, а в колоннах ЭК3 и ЭК4 – реэкстракция плутония и урана. Колонна ЭК5 предназначена для промывки экстрагента. Демпферы ДМ1 и ДМ2 используются для сглаживания пульсаций потока органической фазы, а сепараторы СП1 и СП2 – для отделения захваченной водной фазы от органической.

В настоящее время на установке «Утес» реализуется как первый, так и второй циклы экстракционной очистки облученного ядерного топлива.

Выносные пневматические пульсационные насосы (ВПН) используются для перекачки органической фазы по каскаду. Органическая фаза поступает в предкамеры пульсационных насосов из верхних отстойных зон пульсационных колонн самотеком. Каждая колонна снабжена пульсационной камерой, обеспечивающей интенсификацию процесса экстракции за счет пульсации столба жидкости. Кроме того, в колоннах имеются встроенные пульсационные насосы, обеспечивающие откачку водной фазы из нижних отстойных зон.

Подача сжатого воздуха к пульсационным камерам колонн и пульсационным насосам осуществляется с помощью 16 пульсаторов П1...П16. Для стабилизации давления воздуха, используемого для питания пульсаторов, применяются 16 ресиверов Р1...Р16.

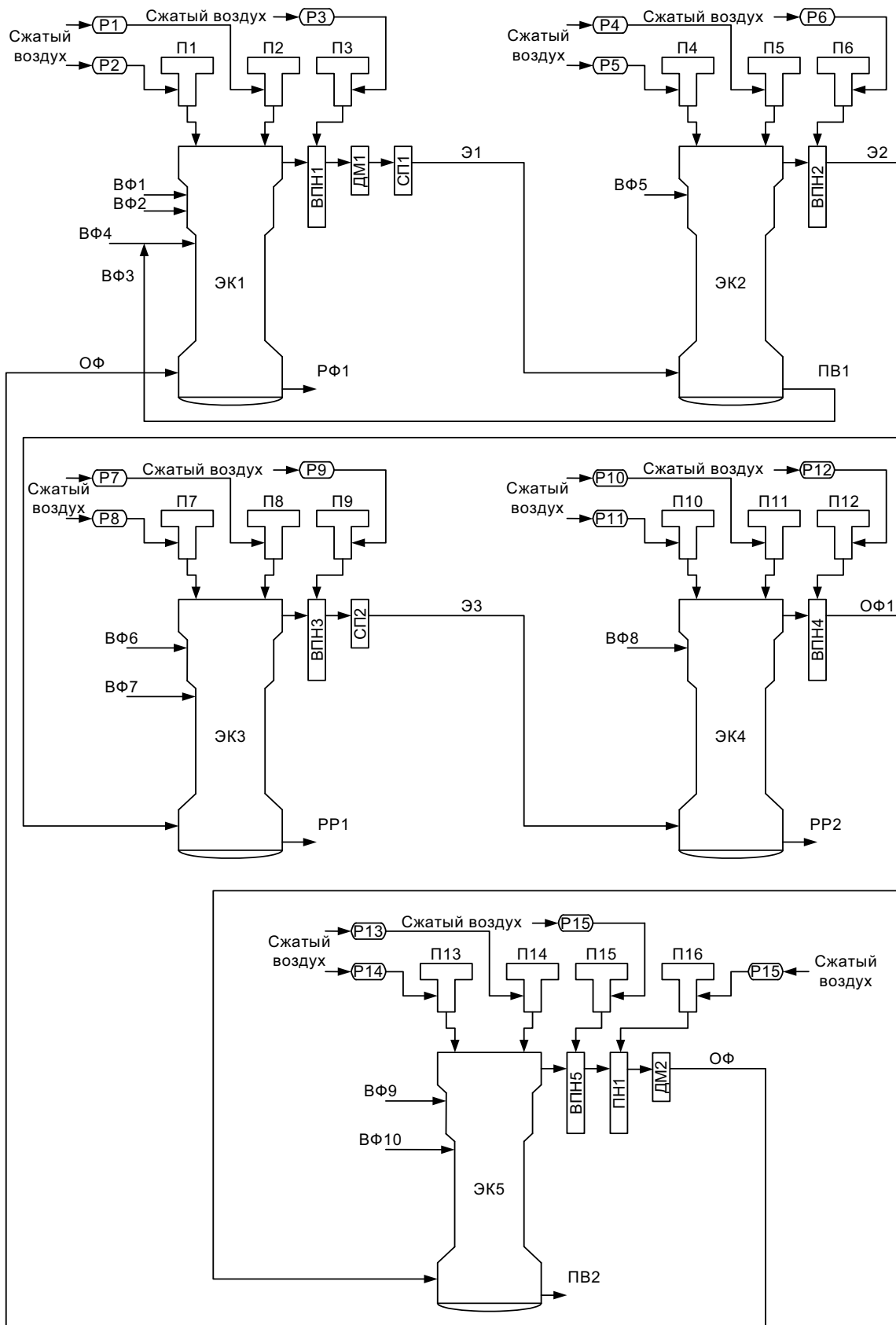


Рис. 2.1. Упрощенная технологическая схема экстракционного каскада

Таблица 2.1

Описание потоков экстракционного каскада

Обозначение потока	Название потока	Фаза
1	2	3
ОФ	оборотный экстрагент	органическая
ВФ4	азотнокислый раствор урана, плутония, продуктов деления	водная
Э1	экстрагент, насыщенный ураном, плутонием, частично продуктами деления	органическая
ПВ1	азотнокислый раствор от промывки насыщенного экстракта	водная
ВФ2	реэкстракт плутония после разрушения гидразин-нитрида	водная
ВФ1	азотнокислый раствор уранила	водная
РФ1	рафинат исходного раствора	водная
ВФ5	азотнокислый промывной раствор	водная
Э2	экстракт, отмытый от осколков деления	органическая
ВФ7	восстановительный раствор четырехвалентного урана с гидразином	водная
ВФ6	вытеснительный раствор азотнокислого уранила	водная
РР1	реэкстракт плутония	водная
Э3	экстракт урана	органическая
РР2	азотнокислый раствор уранила	водная
ВФ8, ВФ9	раствор азотной кислоты	водная
ВФ10	раствор соды	водная
ПВ2	карбонатный раствор	водная

Оборотный экстрагент – органическая фаза (ОФ) – поступает из верхней отстойной зоны ЭК5 через выносной пульс-насос ВПН5, пульс-насос ПН1 (установлен рядом с ЭК1 для усиления давления) и демпфер (ДМ2) на нижнее распределительное кольцо ЭК1. На третье сверху распределительное кольцо подается азотнокислый раствор, содержащий уран, плутоний и осколки деления (водная фаза ВФ4). На первое сверху распределительное кольцо подается промывка (ВФ1) для отмывки экстракта, представляющая собой водный раствор уранилнитрата. На третье сверху кольцо поступает раствор (реэкстракт плутония после разрушения гидразин-нитрида [94]) – ВФ2, используемый для рефлексирования плутония. Кроме того, на третье сверху кольцо (вместе с ВФ4) подается из нижней отстойной зоны ЭК2 азотнокислый раствор урана от отмывки экстракта в ЭК2 – ВФ3. Рафинат РФ1, содержащий высокоактивные продукты деления, откачивается из нижней отстойной

зоны ЭК1 с помощью встроенного пульс-насоса, а экстракт Э1, содержащий уран и плутоний, подается с помощью ВПН1 через демпфер ДМ1 и сепаратор СП1 на нижнее распределительное кольцо в ЭК2. На верхнее распределительное кольцо ЭК2 поступает азотнокислый раствор – ВФ5, используемый для промывки Э1. Подвергнувшийся дополнительной очистке от осколков деления экстракт Э2 перекачивается на нижнее распределительное кольцо ЭК3, а водный раствор ПВ1 (ВФ3) откачивается из нижней отстойной зоны для повторного экстрагирования в ЭК1. В ЭК3 происходит восстановительно-вытеснительная реэкстракция плутония. Для этой цели на второе сверху распределительное кольцо подается восстановительный азотнокислый раствор четырехвалентного урана – ВФ7, обеспечивающий восстановление плутония до трехвалентного состояния. На верхнее распределительное кольцо поступает восстановительно-вытеснительный водный раствор – ВФ6, который за счет наличия в нем шестивалентного урана способствует дополнительной реэкстракции из органической фазы осколков деления.

Реэкстракт плутония РР1 откачивается из нижней отстойной зоны для дальнейшей переработки, а экстракт урана Э3 после сепарации в СП2 поступает на нижнее распределительное кольцо колонны ЭК4. На верхнее распределительное кольцо подается разбавленная азотная кислота – ВФ8, в которую реэкстрагируется уран из органической фазы. Реэкстракт урана РР2 после концентрации подвергается дальнейшей очистке во втором урановом цикле переработки облученного ядерного топлива.

В колонне ЭК5 экстрагент ОФ1 регенерируется для дальнейшего использования для промывки с целью удаления продуктов деления и продуктов разложения трибутилфосфата с помощью раствора ВФ9, подаваемого на верхнее распределительное кольцо, и ВФ10 (содовый раствор), подаваемого на второе кольцо сверху. Промраствор из нижней отстойной зоны ЭК5 (ПВ2) в дальнейшем смешивается с РФ1.

При осуществлении второго цикла применяется аналогичная структура экстракционной очистки с использованием 5 колонн. Отличием является отсутствие потоков ВФ1, ВФ2 и ВФ7. В колонне ЭК3 происходит дополнительная промывка экстракта из колонны ЭК2 (для промывки используется 2 колонны ЭК2 и ЭК3) с помощью азотнокислого промывного раствора ВФ6. При этом ВФ5 откачивается из нижней отстойной зоны ЭК3 и поступает в ЭК2 (трубопроводы РР1 и ВФ5 соединяются между собой).

2.2. Структура технических средств измерения и контроля технологических параметров

Для измерения уровня и объёма жидкостей в технологических аппаратах на РХЗ применяются следующие типы приборов:

- НСУ-1(2) – нейтронный следящий уровнемер;
- НИОУ-1(М) – нейтронный измеритель отклонения уровня;
- НРУ-1 – нейтронное реле уровня;
- УБ-Э – уровнемер буйковый электрический;
- УВВ – уровнемер высокочастотный взрывозащищенный;
- УВМ – уровнемер высокочастотный многоканальный;
- «Дельфин Ц» – уровнемер поплавковый;
- ДРГ-1еЮ – сканирующее устройство измерения гамма-активности;
- СУ-02П – ультразвуковой сигнализатор уровня;
- СПРС1И с датчиком СУЭ-Д – контактный сигнализатор уровня;
- «Градиент» – сканирующий прибор измерения тонких слоев органической фазы, по скачкам сопротивления растекания.

2.2.1. Нейтронный следящий уровнемер

Нейтронный следящий уровнемер (НСУ-1) предназначен для бесконтактного, непрерывного, автоматического, дистанционного измерения уровня агрессивных пенящихся и кристаллизующихся водородосодержащих сред в технологических аппаратах.

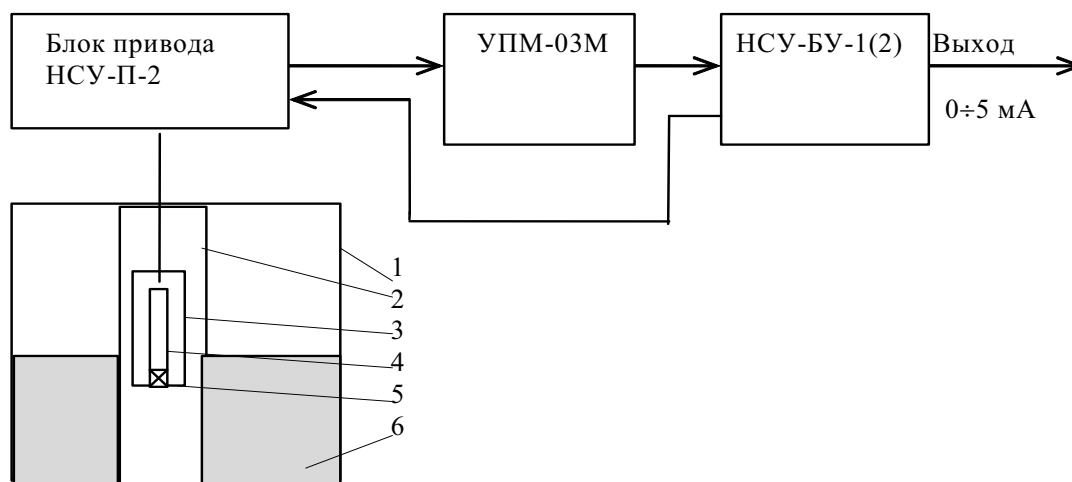
Технические характеристики прибора:

- верхние пределы измерения уровня: 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0 м;
- предел допускаемой основной абсолютной погрешности не превышает $\pm 15(10)$ мм при измерении уровня воды;
- зона нечувствительности не превышает ± 10 мм;
- напряжение питания – 220 В.

Принцип работы уровнемера основан на регистрации датчиком (счетчиком СНМ-14 или камерой КНТ-31) замедленных (атомами водорода контролируемой среды) нейтронов, излучаемых источником быстрых нейтронов, и поддержании заданной скорости счета импульсов следящей системой уровнемера. Середина датчика автоматически устанавливается на границе раздела фаз «воздух–жидкость».

Структурная схема уровнемера приведена на рис. 2.2. В отсутствие измеряемой среды скорость счета тепловых нейтронов практически равна нулю. При подходе уровня жидкости к датчику быстрые нейтроны, испускаемые источником, замедляются на ядрах водорода жидкости до тепловых энергий, и часть из них, диффундирующая в сторону де-

тектора, регистрируется им. Увеличение уровня жидкости в аппарате влечет за собой увеличение скорости счета нейтронов. Следящая система уровнемера поддерживает на заданном уровне скорость счета нейтронов (40÷60 %), регистрируемых чувствительным элементом датчика, что соответствует вполне определенному положению датчика относительно уровня жидкости.



*Рис. 2.2. Структурная схема уровнемера НСУ-1(2):
1 – цистерна; 2 – карман проходки; 3 – датчик НСУ-Ч (НИОУ-2Д);
4 – счетчик СНМ-14 (камера КНТ-31); 5 – источник быстрых нейтронов;
6 – контролируемая среда*

О положении уровня жидкости в аппарате можно судить либо по шкале прибора НСУ-БУ, либо по величине стандартного выходного сигнала 0÷5 мА на выходе НСУ-БУ.

Уровнемер НСУ-1(2) применяется для измерения уровня водной и органической фаз.

2.2.2. Нейтронный измеритель отклонения уровня

Нейтронный измеритель НИОУ-1М предназначен для измерения отклонения уровня агрессивных водородосодержащих сред в технологических аппаратах.

Технические характеристики прибора:

- пределы измерения отклонения уровня жидкости ± 140 мм с датчиком НИОУ-1Д и ± 70 мм – с датчиком НИОУ-2Д;
- основная погрешность измерителя не более ± 15 мм в диапазоне измерения от -60 до $+60$ мм; в остальном диапазоне с датчиком НИОУ-1Д – не более ± 30 мм; во всем диапазоне с датчиком НИОУ-2Д – ± 30 мм.

Измеритель НИОУ-1М является индикатором отклонения уровня, несмотря на то, что имеет измерительную характеристику с определенной погрешностью для каждого типа датчика. Причина заключается в том, что устанавливаются датчики НИОУ в местах, исключающих возможность проведения процедуры градуировки уровня. Исключение составляют НИОУ-1М, установленные на сообщающихся сосудах (с колонами), для определения ЗДФ. Для датчиков этих НИОУ специально снимаются характеристики на имитаторах сосудов, а затем эти датчики точно устанавливаются в сообщающиеся сосуды.

В состав измерителя входят:

- измеритель скорости счета УИО-01;
- устройство преобразования УПМ-03;
- датчик НИОУ-1Д (счетчик СММ-11 и плутоний-бериллиевый источник быстрых нейтронов (ИБН) с выходом $5 \cdot 10^5$ н/с) или НИОУ-2Д (камера КНТ-31 и ИБН с выходом $1 \cdot 10^6$ н/с).

Принцип работы измерителя основан на регистрации датчиком (счетчиком СММ-14 или камерой КНТ-31) замедленных (контролируемой средой) нейтронов, излучаемых источником быстрых нейтронов. Структурная схема НИОУ приведена на рис. 2.3.

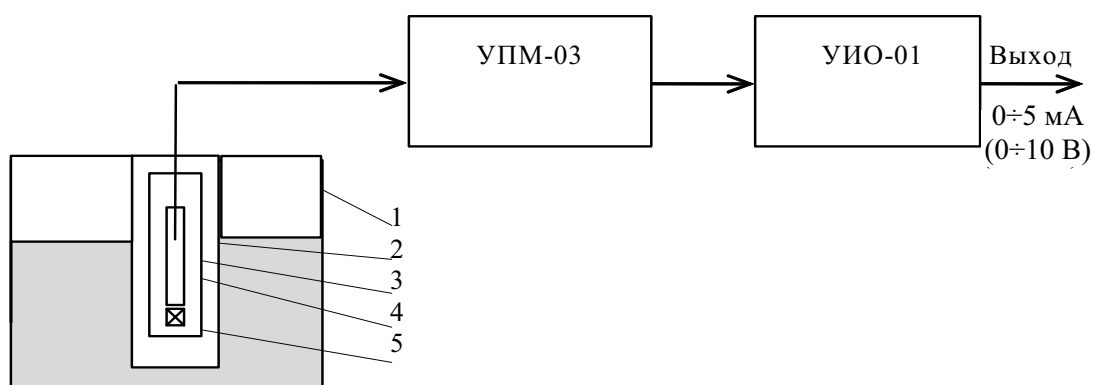


Рис. 2.3. Структурная схема НИОУ-1М:

1 – цистерна; 2 – карман проходки; 3 – датчик НИОУ-1Д (НИОУ-2Д);
4 – детектор СММ-11 (КНТ-31); 5 – источник ИБН-6 (ИБН-7)

В отсутствие измеряемой среды скорость счета тепловых нейтронов практически равна нулю. При подходе уровня жидкости к датчику быстрые нейтроны, испускаемые источником, замедляются на ядрах среды до тепловых энергий и часть из них, диффундирующая в сторону детектора, регистрируется им. Увеличение уровня среды в аппарате влечет за собой увеличение скорости счета нейтронов, регистрируемое прибором УИО-01. О положении уровня среды в цистерне можно судить либо по шкале стрелочного прибора измерителя скорости счета

УИО-01, либо по величине стандартных выходных сигналов $0 \div 5$ мА, $0 \div 10$ В, снимаемых с разъема «ВЫХОД» прибора УИО-01.

Нейтронный измеритель отклонения уровня НИОУ-1М применяется для измерения отклонения уровня водной и органической фазы, а также как датчик отклонения уровня в системах автоматического регулирования (стабилизации) уровня.

2.2.3. Нейтронное реле уровня

Нейтронное реле уровня (НРУ-1) предназначено для бесконтактного измерения и сигнализации отклонения от заданного значения уровня агрессивных водородосодержащих сред в технологических аппаратах и при ямках каньонов. С датчиком НСУ-Ч (счетчик СНМ-14) реле предназначено только для сигнализации.

Технические характеристики прибора:

- пределы измерения отклонения уровня жидкости ± 140 мм с датчиком НИОУ-1Д (НИОУ-3Д) и ± 70 мм с датчиком НИОУ-2Д;
- основная погрешность измерителя не более ± 15 мм в диапазоне измерения от -60 до $+60$ мм; в остальном диапазоне с датчиком НИОУ-1Д (НИОУ-3Д) – не более ± 30 мм; во всем диапазоне с датчиком НИОУ-2Д – ± 30 мм.

В состав реле входят:

- блок управления НРУ-БУ;
- устройства преобразования УПМ-03М или УПМ-02;
- датчик НИОУ-1Д (счетчик СНМ-11 и плутоний-бериллиевый источник быстрых нейтронов (ИБН) с выходом $5 \cdot 10^5$ н/с) или НИОУ-2Д (камера КНТ-31 и ИБН с выходом $1 \cdot 10^6$ н/с) или НИОУ-3Д (счетчик СНМ-18 и ИБН с выходом $5 \cdot 10^5$ н/с) или НСУ-Ч (счетчик СНМ-14 и ИБН с выходом $5 \cdot 10^5$ н/с).

Принцип работы реле основан на регистрации датчиком (счетчиком СНМ-14, СНМ-11 или камерой КНТ-31) замедленных (атомами водорода контролируемой среды) нейтронов, излучаемых источником быстрых нейтронов. Структурная схема НРУ-1 приведена на рис. 2.4.

В отсутствие измеряемой среды скорость счета тепловых нейтронов практически равна нулю. При подходе уровня жидкости к датчику быстрые нейтроны, испускаемые источником, замедляются на ядрах среды до тепловых энергий и часть из них, диффундирующая в сторону детектора, им регистрируется. Увеличение уровня среды в аппарате влечет за собой увеличение скорости счета нейтронов, регистрируемое блоком управления. О положении уровня среды в цистерне можно судить либо по шкале стрелочного прибора блока управления, либо по ве-

личине стандартного выходного сигнала $0 \div 5$ мА, снимаемого с разъема «ВЫХОД 5 мА» блока управления.

Реле уровня НРУ-1 применяется для измерения и сигнализации уровня водной и органической фазы.

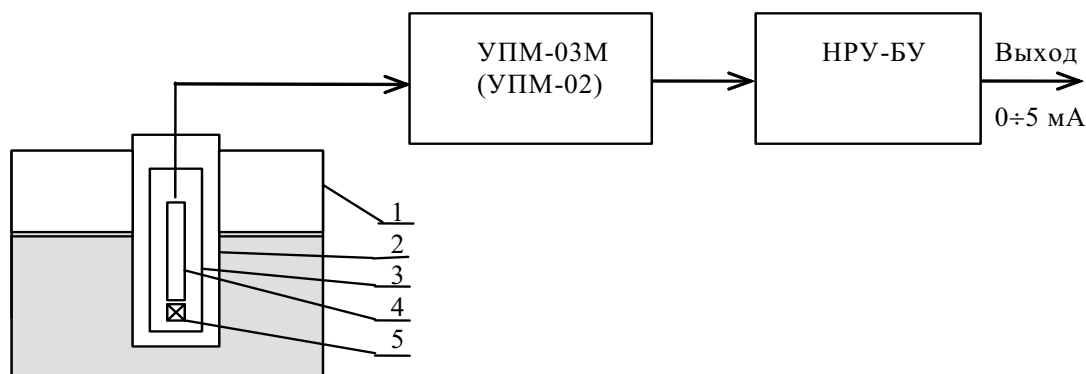


Рис. 2.4. Структурная схема НРУ-1:

1 – цистерна; 2 – карман проходки; 3 – датчик НИОУ-1Д (НИОУ-2Д);
4 – детектор СНМ-11 (КНТ-31); 5 – источник ИБН-6 (ИБН-7)

2.2.4. Уровнемер буйковый электрический

Уровнемер буйковый электрический (УБ-Э) предназначен для измерения уровня жидкостей в технологических аппаратах, а также для работы в системах автоматического регулирования (САР) технологических процессов с целью выдачи информации в виде унифицированного электрического выходного сигнала об уровне жидкости, находящейся под вакуумметрическим, атмосферным или избыточным давлением.

Технические характеристики прибора:

- максимальная величина измеряемого уровня – от 0,02 м до 16 м;
- плотность измеряемой жидкости – $0,6\text{--}2,5$ г/см³;
- интервал температур измеряемой жидкости: $-50 \dots +100$ °С;
- предел допускаемой основной абсолютной погрешности не превышает $\pm 1,5$ %.

В состав уровнемера УБ-Э входят (рис. 2.5):

- измерительный блок;
- унифицированный электросиловой преобразователь.

Измерительный блок представляет собой систему уравновешивающих рычагов. Основным рабочим органом уровнемера является буюк, который представляет собой груз с подвесами, масса и длина которого зависит от величины измеряемого верхнего предела уровня. Рабочая часть буюка находится в контролируемой среде, а подвеска буюка при помощи уравновешивающих рычагов связана с электрическими катушками индикатора рассогласования и силовым механизмом обратной связи.

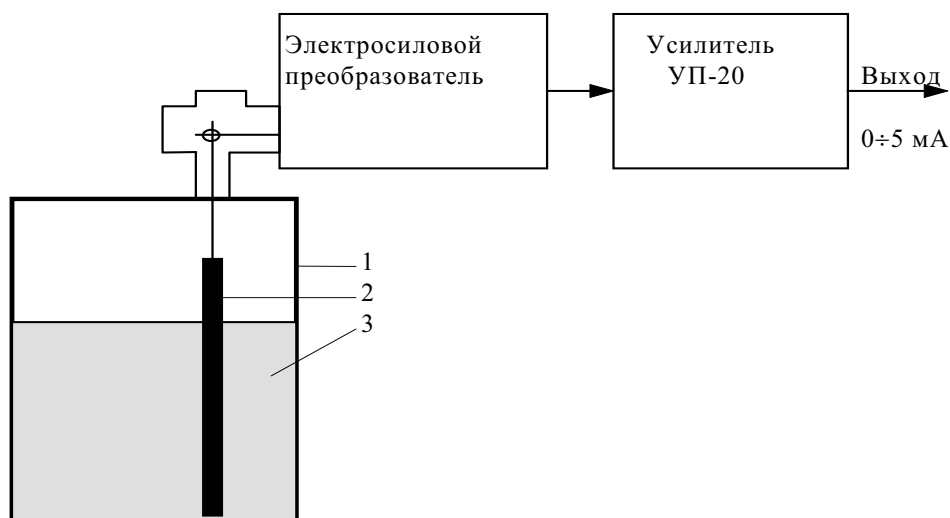


Рис. 2.5. Структурная схема уровнемера УБ-Э:

1 – цистерна; 2 – элемент чувствительный (боек); 3 – контролируемая среда

Унифицированный электросиловой преобразователь служит для усиления (при помощи усилителя) и уравнивания (при помощи взаимодействия магнитного поля катушки силового механизма с магнитным полем постоянного магнита), а также выдачи унифицированного сигнала на вторичный прибор.

Принцип действия уровнемера УБ-Э основан на электрической компенсации выталкивающей силы раствора, действующей на боек.

При изменении уровня раствора на чувствительном элементе измерительного блока возникает усилие, которое образуется за счет изменения веса буйка при действии на него выталкивающей силы раствора, которое через систему рычагов передается на электросиловой преобразователь. Один конец рычага преобразователя связан с плунжером индикатора рассогласования, а другой с подвижной катушкой силового механизма обратной связи. При отклонении плунжера рассогласования от среднего положения по электрической цепи индикатора потечет переменный ток, который поступит на вход усилителя. Усиленный и выпрямленный сигнал в виде постоянного тока проходит через катушку, находящуюся в воздушном зазоре постоянного магнита, и создает магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и создает усилие, которое будет компенсировать усилие, возникшее при изменении уровня раствора, т. е. приведет к уравниванию системы рычагов, вызванное изменением веса буйка.

Уровень УБ-Э применяется для измерения уровня водной и органической фазы, границ раздела фаз двух жидкостей (водной и органической), а также для измерения плотности (концентрации) жидкости (водной и органической).

2.2.5. Уровнемер высокочастотный взрывозащищенный

Уровнемер высокочастотный взрывозащищенный (УВВ) предназначен для дистанционного измерения уровня электропроводящих, в том числе агрессивных и взрывоопасных жидкостей с удельной электропроводностью не менее 10 См/м в технологических цистернах. Уровнемер используется в комплекте с регистрирующей и показывающей аппаратурой, работающей со стандартными частотным (0÷10 кГц) и токовым (0÷5 мА) выходными сигналами.

Технические характеристика прибора:

- максимальная величина измеряемого уровня – от 0.4 до 11 м;
- предел допускаемой основной абсолютной погрешности не превышает $\pm 1\%$;
- температура измеряемой жидкости – от 10 до 110 °С.

В состав уровнемера УВВ входят:

- преобразователь измерительный УВВ-П;
- датчик УВМ-Д.

Принцип действия уровнемера основан на изменении параметров (индуктивности) чувствительного элемента датчика (колодца датчика) в зависимости от уровня жидкости. Чувствительный элемент представляет собой коаксиальную линию, замкнутую на конце и имеющую индуктивное входное сопротивление.

Чувствительный элемент датчика включен в колебательный контур рабочего генератора. С увеличением (уменьшением) уровня жидкости соответственно уменьшается (увеличивается) индуктивность чувствительного элемента, что приводит к увеличению (уменьшению) частоты рабочего генератора. Структурная схема уровнемера приведена на рис. 2.6. Уровнемер УВВ применяется для измерения уровня водной фазы.

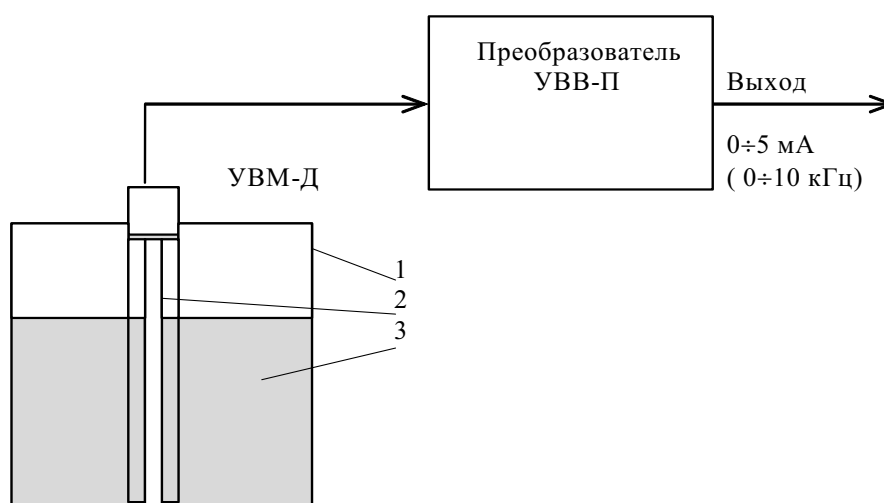


Рис. 2.6. Схема структурная уровнемера УВВ:
1 – цистерна; 2 – датчик; 3 – контролируемая среда

2.2.6. Уровнемер высокочастотный многоканальный

Назначение, технические характеристики и принцип действия уровнемера высокочастотного многоканального (УВМ) аналогичны уровнемеру УВВ. Отличием является наличие многоканального (16 каналов) преобразователя УВМ-П (рис. 2.7). Уровнемер УВМ применяется для измерения уровня водной фазы.

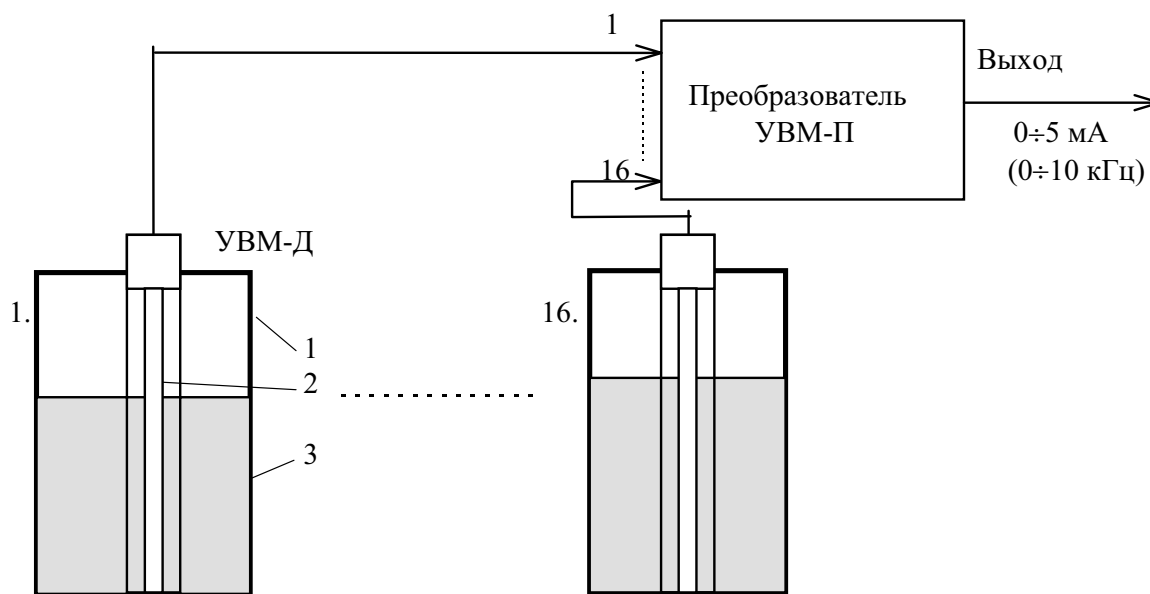


Рис. 2.7. Схема структурная уровнемера УВМ:
1 – цистерна; 2 – датчик; 3 – контролируемая среда

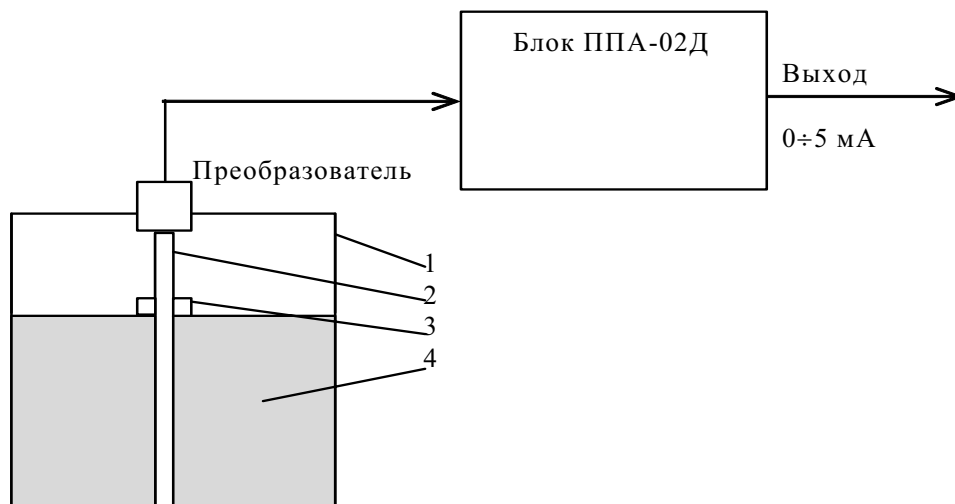
2.2.7. Уровнемер поплавковый «Дельфин Ц»

Уровнемер «Дельфин Ц» предназначен для измерения уровней агрессивных жидких реагентов, в том числе взрывоопасных, находящихся в закрытых или открытых цистернах.

Технические характеристики прибора:

- максимальная величина измеряемого уровня – от 1,0 до 8,0 м;
- предел допускаемой основной абсолютной погрешности не превышает $\pm 1,5\%$;
- выходной сигнал – $0\div 5$ мА;
- температура измеряемой жидкости – от -30 до $+50$ °С;
- плотность жидкости – от 0,5 до 1,4 г/см³.

В состав уровнемера входят: преобразователь П2.008.012; блок ПДА-02Д. Структурная схема уровнемера приведена на рис. 2.8.



*Рис. 2.8. Схема структурная уровнемера «Дельфин Ц»:
1 – цистерна; 2 – корпус преобразователя; 3 – поплавок с магнитом;
4 – контролируемая жидкость*

Преобразователь погружного типа рассчитан на вертикальную установку в цистерну. Он представляет собой неразборный корпус, выполненный из немагнитного материала, снаружи которого свободно расположен поплавок с магнитом, а внутри размещены платы, на которых смонтированы герконы, смещенные относительно друг друга вдоль оси преобразователя на расстоянии 1 см или 2 см и измерительной цепочки последовательно соединенных резисторов, шунтированных контактами герконов.

Блок ПДА-02Д предназначен для питания измерительной цепочки резисторов преобразователя стабилизированным током, а также для преобразования, получаемого на выходе преобразователя, в стандартный выходной сигнал постоянного тока 0÷5 мА и отображения измеряемого уровня в цифровом виде.

Принцип действия уровнемера заключается в том, что перемещение поплавка с магнитом вдоль группы герконов сопровождается изменением сопротивления измерительной цепочки резисторов, связанного линейно с изменением уровня контролируемой жидкости.

Уровнемер «Дельфин Ц» применяется для измерения уровня водной и органической фазы.

2.2.8. Сканирующее устройство ДРГ-1еЮ

Устройство сканирования ДРГ-1еЮ предназначено для сканирования технологических цистерн и пульсационных колонн на обнаружение градиента гамма-активности.

Технические характеристики:

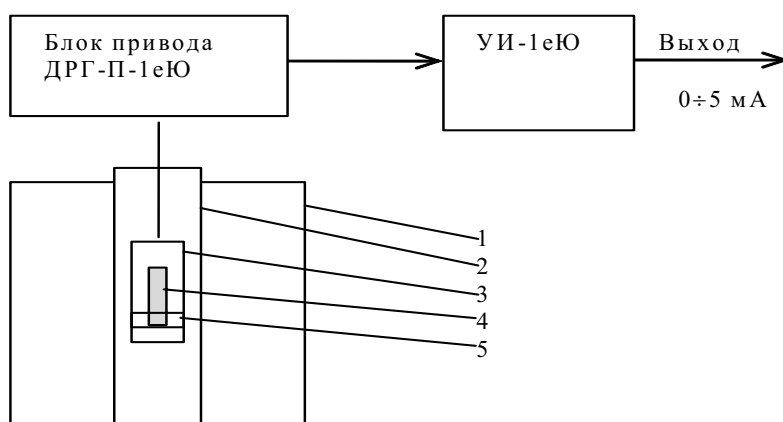
- диапазон измерений устройства сканирования составляет от $0,8 \cdot 10^4$ до $8,0 \cdot 10^{-2}$ А/кг;

- расстояние перемещения детектора блоком привода – не менее 15 м;
- выходной сигнал блока управления составляет 0÷5 мА.

В состав устройства входят:

- узел детектора ПДПГ-1еЮ;
- блок привода ДРГ-П-1еЮ;
- блок управления и измерения УИ-1еЮ.

Принцип действия устройства сканирования состоит в следующем: фон цистерны (колонны) или раствора воздействует на р–п-переход полупроводникового детектора ППД-80 и вызывает появление на его выходе постоянного тока. Величина тока пропорциональна величине фона в месте расположения детектора. Структурная схема устройства сканирования приведена на рис. 2.9.



*Рис. 2.9. Структурная схема устройства сканирования:
1 – цистерна; 2 – карман проходки; 3 – корпус узла детектора;
4 – полупроводниковый детектор ПД-80; 5 – кольцевая щель*

С помощью ДРГ-1еЮ определяют накопление гамма-активных отложений на конструкциях цистерн и колонн, а также определяют наличие слоев органической фазы в цистернах, предназначенных для переработки водных растворов.

2.2.9. Ультразвуковой сигнализатор уровня СУ-02П-01(02)

Сигнализаторы уровня СУ-02П-01(02) предназначен для контроля положения границы раздела двух несмешивающихся фаз «газ–жидкость», для сигнализации и включения элементов автоматики в момент достижения жидкостью заданного уровня.

Технические характеристики прибора:

- погружная длина сигнализаторов уровня: для СУ-02П-01 – от 200 до 10000 мм; для СУ-02П-02 – от 10000 до 15000 мм;
- предел допускаемой основной абсолютной погрешности срабатывания сигнализатора уровня – не более $\pm 5,0$ мм.

В состав сигнализатора входят:

- блок электронный сигнализатора уровня (СУ-02П);
- штанга – 01(02).

Принцип действия сигнализатора основан на изменении резонансной частоты колебаний лепестков первичного преобразователя в зависимости от плотности окружающей его среды (жидкость или воздух). Структурная схема сигнализатора уровня приведена на рис. 2.10.

Сигнализатор уровня (СУ-02П) применяется для сигнализации уровня водной и органической фазы.

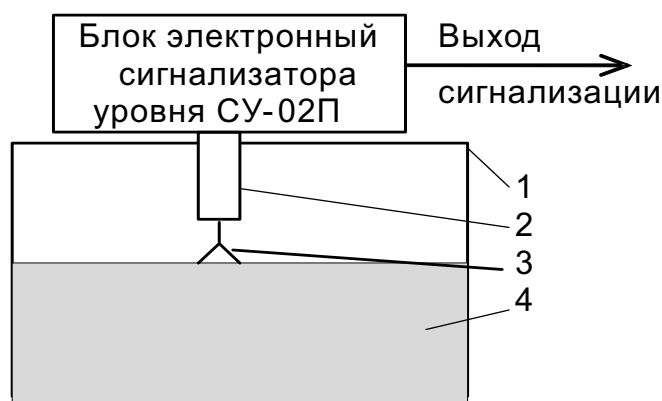


Рис. 2.10. Структурная схема сигнализатора уровня:

1 – цистерна; 2 – штанга первичного преобразователя;
3 – лепестки первичного преобразователя; 4 – контролируемая среда

2.2.10. Контактный сигнализатор уровня

Сигнализатор уровня предназначен для контроля положения раздела фаз «газ–жидкость» и сигнализации в момент достижения жидкости заданного уровня.

Зоны гарантированной сигнализации указаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Зоны гарантированной сигнализации

Обозначение сигнализатора	Зона гарантированной сигнализации	
	Срабатывание, кОм	Отпускание, кОм
СПРС1И-Э	от 0 до 2,0	от 10,0 до 100000,0
СПРС1И-М	от 0 до 10,0	от 50,0 до 100000,0
СПРС1И-Р	от 0 до 50,0	от 220,0 до 100000,0
СПРС1И-В	от 0 до 220,0	от 1000,0 до 100000,0

Технические характеристики прибора:

- величина коммутируемого тока до 0,25 А при напряжении – не более 30 В;
- напряжение питания – 220 В.

В состав комплекта входят:

- сигнализатор СПРС1И;
- датчик СУЭ-Д, С-57-1(2).

Принцип действия сигнализатора основан на измерении электрического сопротивления датчика и включении устройства коммутации при достижении значения сопротивления, соответствующего одной из зон гарантированной сигнализации.

Структурная схема сигнализатора приведена на рис. 2.11.

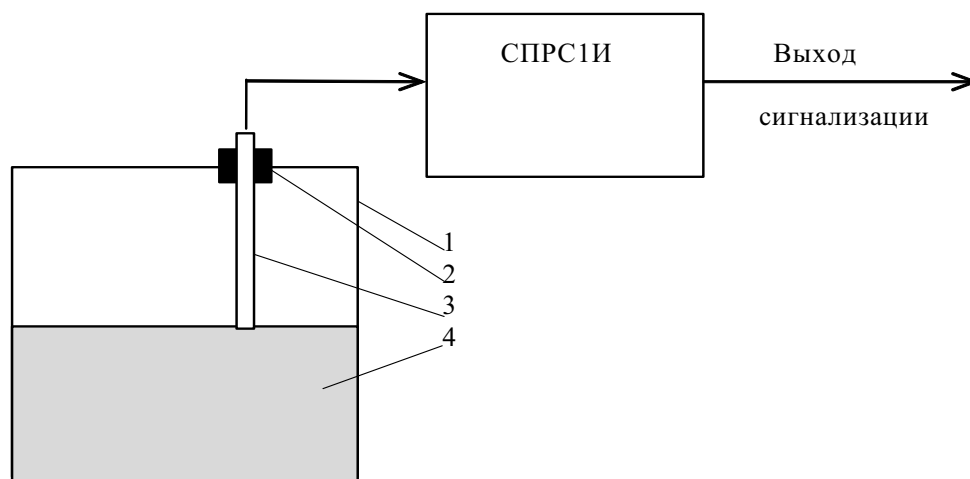


Рис. 2.11. Структурная схема сигнализатора уровня:

1 – цистерна; 2 – изолятор; 3 – датчик; 4 – контролируемая жидкость

Сигнализатор уровня применяется для сигнализации уровня водной фазы.

2.2.11. Прибор «Градиент»

Прибор «Градиент» предназначен для определения толщины слоя органической фазы на поверхности водных растворов в технологических цистернах, кроме того выполняет функцию контактного сигнализатора верхнего уровня.

Технические характеристики прибора:

- диапазон сканирования – 0÷500 мм;
- погрешность измерения – ±2 мм.

В состав прибора входят:

- сканирующий датчик;
- сигнализатор предельных сопротивлений СПРС1И (модифицированный);
- первичный преобразователь;
- вторичное устройство.

Блок-схема прибора «Градиент» показана на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Схема измерения толщины слоя органической фазы в технологической цистерне на основе сканирующего устройства «Градиент»: 1 – цистерна; 2 – электрод; 3 – слой органической фазы; 4 – водная фаза

В основу измерения слоя органической фазы положено измерение временного интервала (считается, что скорость линейного перемещения электрода постоянна и известна) между скачками сопротивления сканирующего электрода.

Сканирующий датчик имеет три концевых выключателя (верхний, нижний и промежуточный). Принцип сканирования – бесконтактная передача перемещения за счет сильных магнитов. Датчик снабжен сменным электродом, длина которого определяется для каждой цистерны.

В схему существующего сигнализатора СПРС1И внесены изменения, позволяющие вывести электрический сигнал в схему первичного преобразователя, сохранив все элементы искрозащиты и элементы, осуществляющие функцию сигнализатора уровня.

В первичном преобразователе вырабатывается аналоговый сигнал, пропорциональный сопротивлению сканирующего электрода, пригодный для трансляции на большие расстояния (до 200 м).

Во вторичном устройстве происходит автоматическое определение толщины слоя органики на поверхности технологических растворов в цистерне. Результаты измерений высвечиваются на цифровом табло, а также передаются на внешнее регистрирующее устройство.

Рассмотрим пример структуры технического измерения и контроля технологических параметров головной колонны установки «Утес» РХЗ (рис. 2.13).

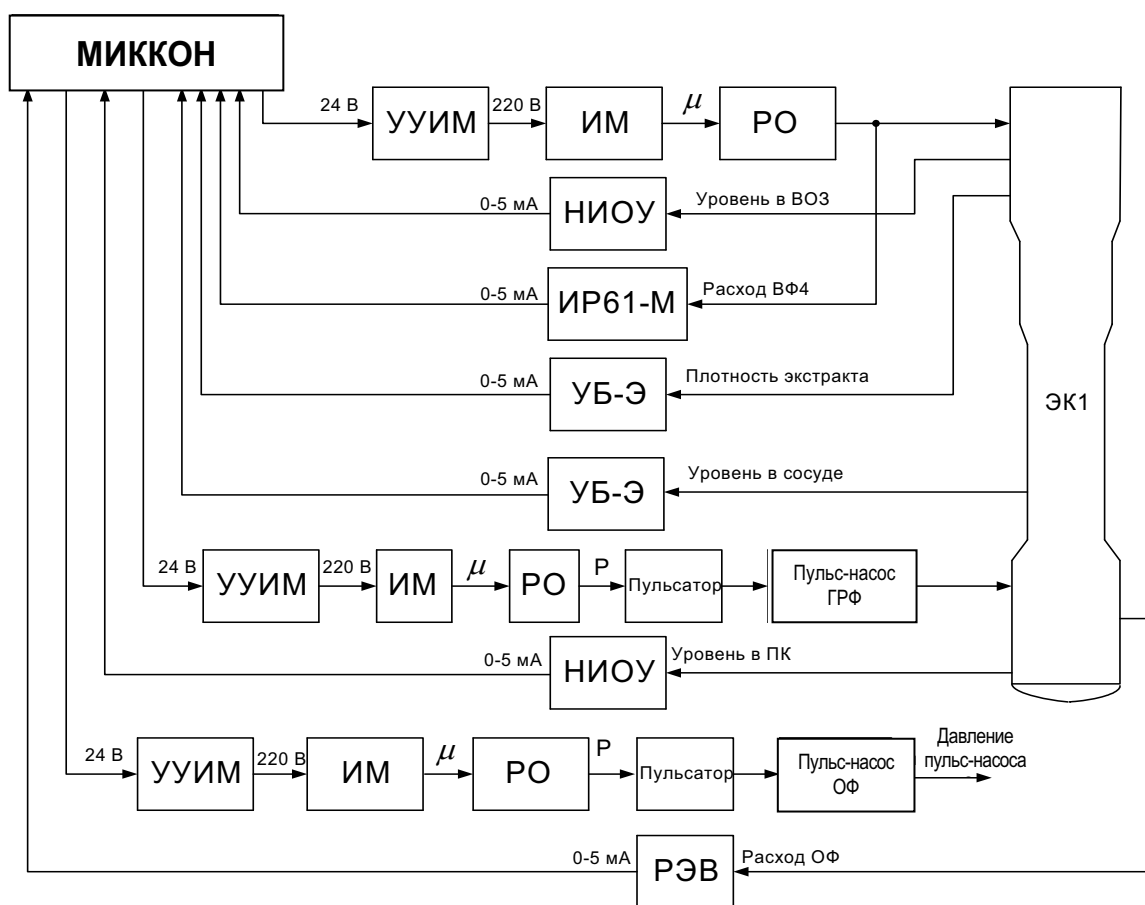


Рис. 2.13. Структура технических средств измерения и контроля технологических параметров ЭК1:

УУИМ – устройство управления исполнительным механизмом;

ИМ – исполнительный механизм постоянной скорости;

РО – регулирующий орган; УБ-Э – уровнемер буйковый электрический;

НИОУ – нейтронный измеритель отклонения уровня;

ИР61-М – электромагнитный расходомер;

РЭВ – ротаметр электрический взрывозащищенный

Основой системы автоматизированного управления установкой является комплекс технических средств «МИККОН» и многофункциональной инструментальной комплексной системы «МИКСИС» [14].

Комплекс технических средств «МИККОН» предназначен для построения АСУ ТП, систем мониторинга, оперативно-диспетчерского управления, информационно-вычислительных систем, систем регистрации, АСНИ и других типов автоматизированных и автоматических систем в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Комплекс позволяет строить как распределенные, так и централизованные системы различной мощности, в том числе и с резервированием как отдельных элементов системы, так и всей системы в целом.

Для измерения уровня и расхода жидкостей в экстракционной колонне ЭК-1 применяются следующие типы приборов:

- НИОУ-1(М) – нейтронный измеритель отклонения уровня;
- УБ-Э – уровнемер буйковый электрический;
- ИР61-М – электромагнитный расходомер.

Для реализации управляющего воздействия на технологический процесс на радиохимических производствах используются исполнительные механизмы постоянной скорости [15, 16].

2.3. Анализ технологического процесса экстракции урана и плутония

2.3.1. Состав и максимальная емкость органической фазы

На установке «Утес» в качестве органической фазы используется раствор трибутилфосфата (ТБФ) в керосине [11, 12]. При экстракции таким раствором из азотнокислых растворов от растворения облученного ядерного горючего и подготовленных к экстракции, в соответствии с величинами коэффициентов распределения, первым экстрагируется уранилнитрат (УН), затем нитрат четырехвалентного плутония, далее азотная кислота и, наконец, продукты деления. Так как коэффициенты распределения по урану существенно больше, чем по кислоте и продуктам деления, а концентрация плутония на два порядка меньше, чем урана, то при моделировании учитывается лишь экстракция урана [13, 12].

Рассчитаем максимальную емкость ОФ по урану. Введем обозначения:

$$C_{\text{тбф}} = 100 \cdot \alpha, \quad (2.1)$$

где α – содержание ТБФ в растворе ОФ в объёмных долях; $C_{\text{тбф}}$ – объёмная концентрация ТБФ.

Плотность чистой ОФ вычисляется по следующей формуле [12]:

$$\rho_{\text{оф}} = \alpha \cdot (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{р}}) + \rho_{\text{р}}, \quad (2.2)$$

где $\rho_{\text{т}} = 975 \text{ кг/м}^3$ – плотность ТБФ; $\rho_{\text{р}} = 750 \text{ кг/м}^3$ – плотность разбавителя.

Масса ТБФ в одном литре ОФ определяется соотношением:

$$m_{\text{тбф}} = \frac{\rho_{\text{т}} \cdot 1000 \cdot \alpha}{1000} = \rho_{\text{т}} \cdot \alpha \text{ (г)}. \quad (2.3)$$

С другой стороны, на основе того, что одна молекула УН присоединяет к себе две молекулы ТБФ [12], масса УН в одном литре раствора составляет:

$$m_{\text{ун}} = \frac{M_{\text{ун}} \cdot m_{\text{тбф}}}{2 \cdot M_{\text{тбф}}} \text{ (г)}, \quad (2.4)$$

где

$$M_{\text{ун}} = M[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2] = 394 \text{ (г/моль)} - \quad (2.5)$$

молярная масса уранилнитрата;

$$M_{\text{тбф}} = M[(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}] = 266 \text{ (г/моль)} - \quad (2.6)$$

молярная масса ТБФ.

С учетом (2.4) масса урана (U_{238}^{92}) в одном литре раствора ОФ определяется выражением:

$$m_{\text{у}} = \frac{M_{\text{у}} \cdot m_{\text{ун}}}{M_{\text{ун}}} \text{ (г)}, \quad (2.7)$$

где $M_{\text{у}} = M[\text{U}_{238}^{92}] = 238 \text{ г/моль}$ – молярная масса урана.

С использованием (2.3) – (2.7) общее выражение для определения объёмной концентрации урана имеет вид:

$$C_{\text{у}}^{\text{max}} = \frac{M_{\text{у}} \cdot \frac{M_{\text{ун}} \cdot \rho_{\text{т}} \cdot \alpha}{2 \cdot M_{\text{тбф}}}}{M_{\text{ун}}} = \frac{M_{\text{у}} \cdot \rho_{\text{т}}}{2 \cdot M_{\text{тбф}}} \cdot \alpha = \frac{238 \cdot 975}{2 \cdot 266} \cdot \alpha \approx 436 \cdot \alpha \text{ (г/л)} - \quad (2.8)$$

максимальная концентрация урана в ОФ (максимальная емкость ОФ по урану). Например, для $\alpha = 0,26$ максимальная концентрация урана в ОФ составит: $C_{\text{у}}^{\text{max}} \approx 113 \text{ г/л}$.

2.3.2. Назначение и работа головной экстракционной колонны

На рис. 2.14 изображена схема основных потоков головной экстракционной колонны ЭК1. Колонна ЭК1 предназначена для экстракции урана и плутония и вымывания из органической фазы нисходящим потоком азотнокислого водного раствора продуктов деления. В колонне ЭК2 происходит дальнейшая промывка экстракта для удаления высокоактивных продуктов деления.

В колонну ЭК1 поступают четыре водных потока – ВФ1, ВФ2, ВФ3 и ВФ4. ВФ1 подается сжатым воздухом из специальных аппаратов, а его расход регулируется локальным контуром стабилизации с помощью

вентиля ВР1. ВФ2 подается сжатым воздухом из специального аппарата, а его расход регулируется локальным контуром стабилизации с помощью вентиля ВР2. ВФ3 подается непосредственно из нижней отстойной зоны ЭК2 ее встроенным пульс-насосом. ВФ4 подается сжатым воздухом из специальных аппаратов, а его расход регулируется локальным контуром стабилизации с помощью вентиля ВР4. Водная фаза удаляется из нижней отстойной зоны ЭК1 встроенным пульс-насосом в виде рафината. Этот пульс-насос снабжается сжатым воздухом из ресивера Р1 через пульсатор П1. Давление в ресивере стабилизируется локальным контуром с помощью вентиля ВР3. Производительность насоса регулируется вентилем ВР5 в зависимости от уровня ГРФ. Расход ОФ, поступающий в колонну, тоже стабилизируется локальным контуром (путем изменения производительности пульс-насоса ПН1, рис. 2.1). Экстракт Э1 самотеком поступает в предкамеру выносного пульс-насоса ВПН1, который создает дополнительное давление для подачи Э1 через демпфер ДМ1 и сепаратор СП1 на нижнее распределительное кольцо ЭК2. Этот пульс-насос снабжается сжатым воздухом из ресивера Р3 через пульсатор П3. Давление в ресивере стабилизируется локальным контуром с помощью вентиля ВР8. Производительность ВПН1 регулируется вентилем ВР9 в зависимости от уровня в его предкамере.

В колонну ЭК2 подается один водный поток – это промывочный раствор, он подается с помощью сжатого воздуха из специального аппарата, а его расход регулируется локальным контуром стабилизации с помощью вентиля ВР10.

Колонны ЭК1 и ЭК2 связаны по водной фазе (ВФ3). Этот продукт откачивается встроенным пульс-насосом из нижней отстойной зоны ЭК2 (аналогично, как в ЭК1) и подается непосредственно через вентиль ВР11, без использования промежуточных емкостей, на четвертое распределительное кольцо колонны ЭК1 и существенно влияет на гидродинамический режим и соотношение органической и водной фаз в головной колонне каскада. Это влияние объясняется значительной долей ВФ3 (до 30 %) в общем балансе водной фазы колонны. Расход ВФ3 определяется текущей производительностью встроенного пульс-насоса ЭК2, которая зависит от текущего уровня ГРФ в этой колонне, поскольку этот уровень должен поддерживаться постоянным за счет откачки ВФ3. Поэтому стабильность расхода ВФ3 зависит только от стабильности уровня ГРФ в нижней отстойной зоне ЭК2, т. к. расход промывочного раствора стабилен. В результате чего, ЭК1 и ЭК2 по ВФ оказывают существенное взаимное влияние. Следует отметить, что расход ВФ3 не измеряется и является возмущающим воздействием для ЭК1, что существенно усложняет управление этой колонны.

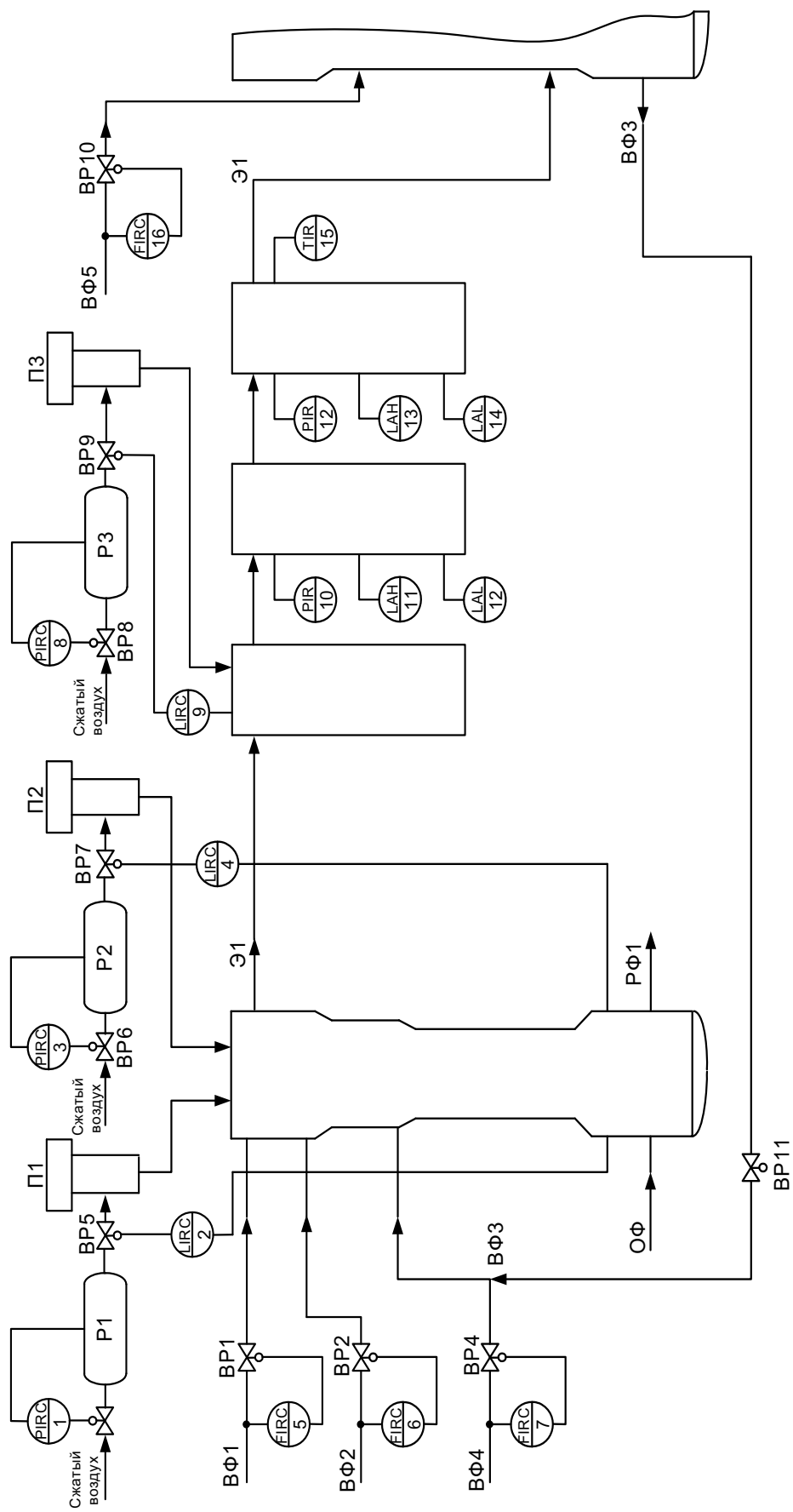


Рис. 2.14. Схема органических и водных потоков ЭЖ1:
 1, 3, 8 – САР давления в ресиверах P1, P2, P3; 2, 4, 9 – САР уровня в ПК1, ГРФ и ВПН1;
 5, 6, 7, 16 – САР расходов ВФ1, ВФ2, ВФ4, ВФ5; 10, 12 – измерение и контроль давления;
 11, 12, 13, 14 – реле уровня

2.3.3. Условия протекания процесса экстракции

Наилучшие условия протекания процесса экстракции обеспечиваются при таком гидродинамическом режиме, когда вертикальное перемещение дисперсной фазы обусловлено гравитационными силами, а перемешивание фаз происходит под воздействием горизонтальных струй жидкости, образующихся на профилированных отверстиях насадки из вертикальных пульсаций столба жидкости, возбуждаемых пульс-камерой колонны. На этот режим влияет также нестабильность уровня в пульс-камерах колонн, вызываемая так называемый поршневой эффект, т. е. вертикальное перемещение струй жидкости. Аналогичный эффект проявляется при нестабильности уровня ГРФ, но его вредное влияние заметно снижено, т. к. скорость перемещения фаз от действия этого эффекта значительно ниже, чем от пульс-камеры, и сравнима со скоростью, обусловленной действием сил тяжести. Это происходит из-за значительно большей площади поперечного сечения нижней отстойной зоны (диаметр 1,6 м) колонны, чем площадь сечения пульс-камеры (диаметр около 0,5 м), вследствие чего скорость и амплитуда изменения уровня ГРФ значительно ниже, чем уровня жидкости в пульс-камере [9, 10].

Иногда проявляется зависимость между степенью очистки ВФ4 от осколков деления, косвенно определяемой по активности экстракта Э1 на выходе колонны и нестабильностью уровня в пульс-камере ЭК1. Эта связь может быть следствием поршневого эффекта более мощного, чем вызываемый нестабильностью ГРФ. Это приводит к дополнительному дроблению капель дисперсной (водной) фазы, в которую переходят осколки деления, и к повышенным механическим уносам этих капель с потоком органической (сплошной) фазы (так называемые водные уносы) [9, 10].

Для уменьшения влияния перечисленных эффектов необходимо стабилизировать как уровень ГРФ, так и уровень в пульс-камере.

2.3.4. Контролируемые переменные головной колонны

Оборудование, установленное на головной колонне ЭК1, схематически представлено на рис. 2.15. При работе во втором цикле экстракционной очистки имеется возможность установки дополнительного индикатора концентрации металла – показателя концентрации металла (ПКМ-1Д), устанавливаемого в свободной сухой трубе, проходящей через экстракционную зону. Датчик ПКМ-1Д состоит из источника γ -излучения «Ирис» и приемника этого излучения – γ -камеры (КГ-11, СКМ-10). Излучение от γ -источника проходит через раствор металла,

где частично поглощается. В результате чего, чем больше концентрация урана в области установки датчика, тем сильнее поглощается γ -излучение и меньше ток γ -камеры. Такой датчик является бесконтактным и позволяет заменить контактный способ измерения концентрации урана с помощью буйкового измерителя плотности. Установка ПКМ в нижней части ЭК1 позволяет контролировать в режиме реального времени концентрацию урана в нижней части колонны (фактически концентрацию урана в рафинате).

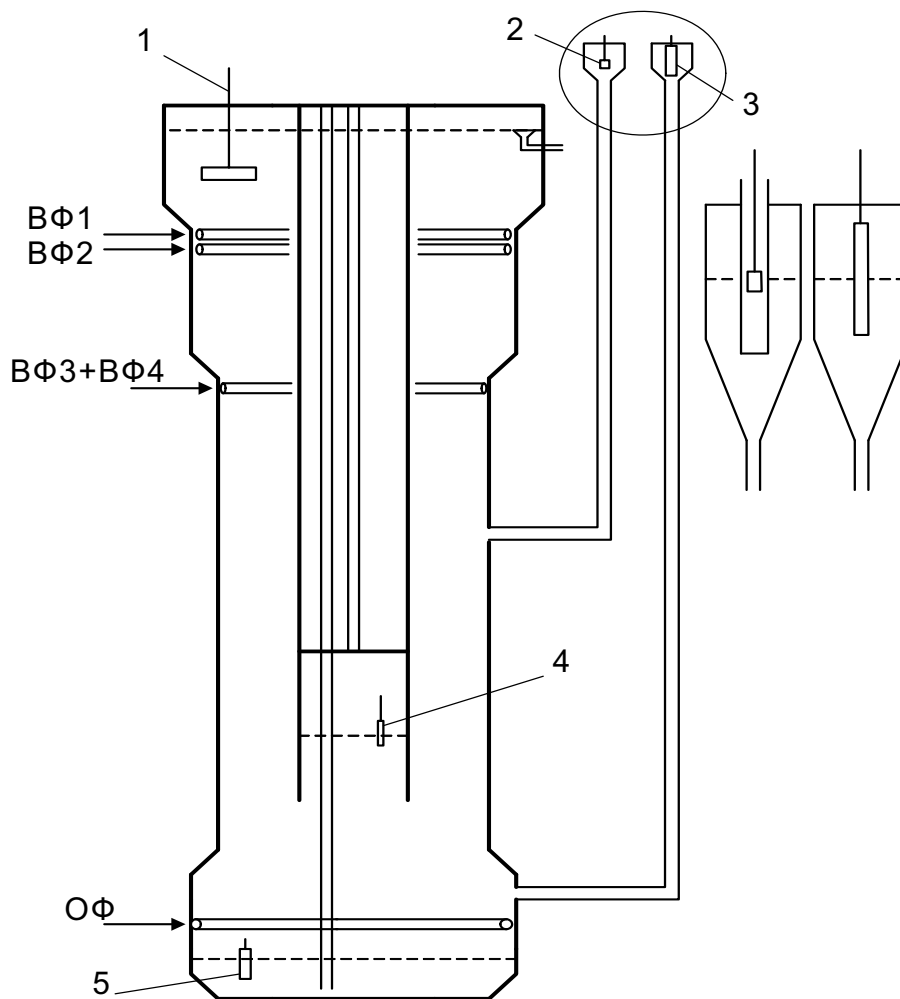


Рис. 2.15. Основные приборы контроля колонны ЭК1:

1 – буйковый измеритель плотности УБ-Э; 2 – нейтронный следящий уровнемер НСУ-1 (уровень в верхнем измерительном сосуде); 3 – буйковый уровнемер УБ-Э (уровень в нижнем измерительном сосуде); 4 – нейтронный индикатор отклонения уровня НИОУ-1М (уровень в пульс-камере); 5 – буйковый уровнемер (ГРФ)

Измерительные сосуды позволяют определять соответствующие веса столбов жидкости и их средние плотности (объем жидкости в колонне не изменяется). В свою очередь, средняя плотность в колонне пропорциональна объему (доле) дисперсной фазы, которую в литера-

туре [9, 10] принято называть объёмом дисперсной фазы или задержкой дисперсной фазы (ЗДФ). Таким образом, измерительные сосуды позволяют вычислять ЗДФ в ЭК1, поэтому уровень жидкости в нижнем измерительном сосуде будем обозначать «ЗДФ низ» (ЗДФН), а в верхнем измерительном сосуде – «ЗДФ верх» (ЗДФВ).

Для измерения веса жидкости в колонне или ЗДФ (средней плотности жидкости) используется гидростатический метод. Для этого к колонне (рис. 2.15 и 2.16) подключены сообщающиеся с ней сосуды, где поддерживается постоянный состав жидкости за счёт подпитки сосуда частью органической фазы, подаваемой на вход данной колонны.

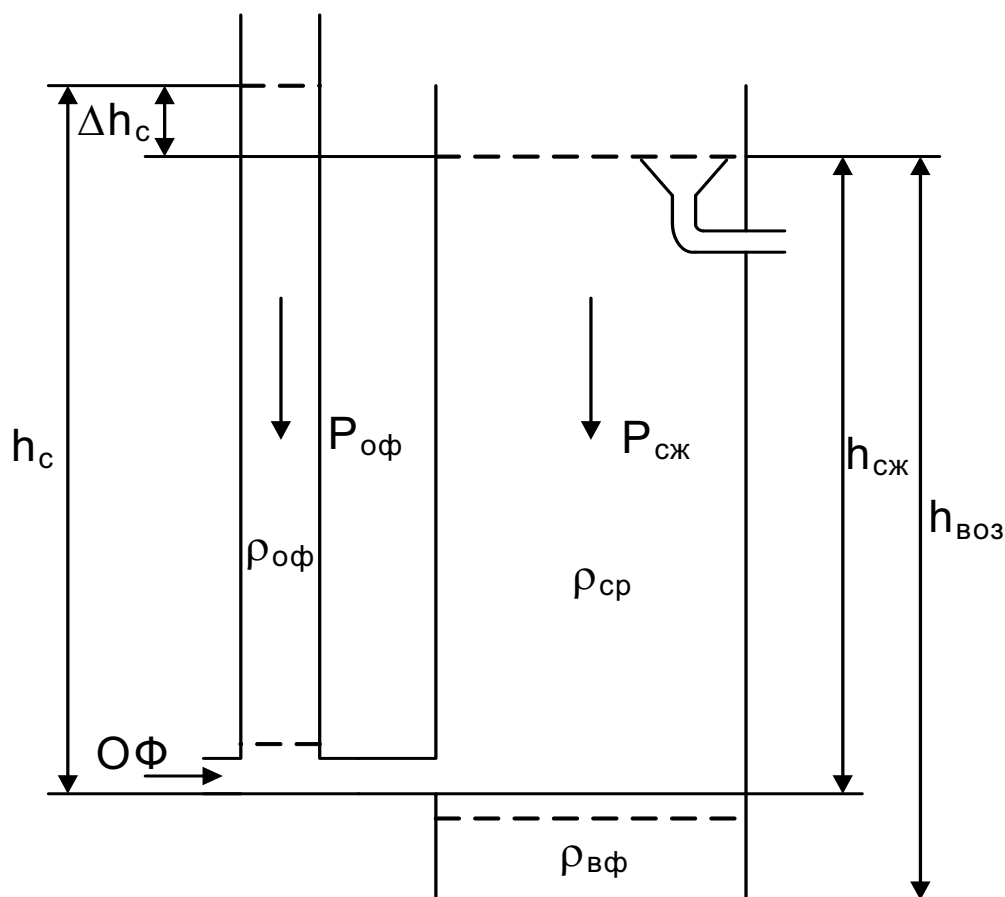


Рис. 2.16. Гидростатический метод измерения средней плотности

Так как уровень в колонне практически не изменяется, а в сосуде находится жидкость с меньшей плотностью, то появится разность давлений вместе соединения измерительного сосуда с колонной ($P_{сж} - P_{оф}$), которая компенсируется за счёт изменения уровня в сосуде. Этот уровень пропорционален общему весу жидкости в колонне (средней плотности жидкости).

Таким образом, изменение плотности жидкости в колонне, а следовательно, и веса жидкости приводит к изменению уровня в сосуде:

$$\Delta h_c = K_c \cdot \Delta \rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot h_{\text{сж}}}{\rho_{\text{оф}}} - h_{\text{сж}} \quad (\text{м}), \quad (2.9)$$

где $h_{\text{сж}}$ – высота столба жидкости, м; $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность столба жидкости, кг/м³; $\rho_{\text{оф}} = 800$ – плотность органической фазы, кг/м³.

В общем случае в процентах шкалы уровнемера выражение (2.9) запишется в виде:

$$\Delta h_c = \frac{100}{\Delta L_{\text{max}}} \cdot \left[\frac{\rho_{\text{ср}} \cdot h_{\text{сж}}}{\rho_{\text{оф}}} - h_{\text{сж}} - h_{\text{см}} \right] = \frac{100}{\Delta L_{\text{max}}} \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{ср}} \cdot h_{\text{сж}}}{\rho_{\text{оф}}} \quad (\%), \quad (2.10)$$

где ΔL_{max} – максимальный измеряемый уровень (шкала уровнемера), м; $h_{\text{см}}$ – смещение шкалы уровнемера (баланс нуля), м.

Для измерения уровня в нижнем сосуде ($L_{\text{здф}}^{\text{низ}}$) используется буйковый уровнемер с параметрами: буюк (диаметром 14 мм, длиной 2000 мм) 100%-й шкалы соответствует выталкивающей силе примерно 2Н (200 гс). Максимальное погружение этого буюка для 100%-й шкалы – 1,7 м. В данном случае высота столба жидкости $h_{\text{сж}} = h_{\text{сж}}^{\text{низ}} = 10$ м, тогда из выражения (2.10) получаем:

$$\begin{aligned} L_{\text{здф}}^{\text{низ}} = \Delta h_c &= \frac{100}{1,7} \cdot \left[\frac{\rho_{\text{ср}}^{\text{низ}} \cdot 10}{800} - 10 - h_{\text{см}} \right] \approx \\ &\approx 0,73 \cdot \rho_{\text{ср}}^{\text{низ}} - 588 - 59 \cdot h_{\text{см}} = 0,73 \cdot \Delta \rho_{\text{ср}}^{\text{низ}} \quad (\%), \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $\rho_{\text{ср}}^{\text{низ}}$ – средняя плотность столба жидкости высотой $h_{\text{сж}}^{\text{низ}}$, кг/м³.

Для измерения уровня жидкости в верхнем измерительном сосуде ($L_{\text{здф}}^{\text{верх}}$) используется нейтронный следящий уровнемер со шкалой 1,6 м.

Для верхнего измерительного сосуда высота столба жидкости $h_{\text{сж}} = h_{\text{сж}}^{\text{верх}} = 6,55$ м. Тогда из выражения (2.10) получаем:

$$\begin{aligned} L_{\text{здф}}^{\text{верх}} = \Delta h_c &= \frac{100}{1,6} \cdot \left[\frac{\rho_{\text{ср}}^{\text{верх}} \cdot 6,6}{800} - 6,6 - h_{\text{см}} \right] \approx \\ &\approx 0,52 \cdot \rho_{\text{ср}}^{\text{верх}} - 409 - 63 \cdot h_{\text{см}} = 0,52 \cdot \Delta \rho_{\text{ср}}^{\text{верх}} \quad (\%), \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $\rho_{\text{ср}}^{\text{верх}}$ – средняя плотность столба жидкости высотой $h_{\text{сж}}^{\text{верх}}$, кг/м³.

Основные переменные головной колонны, рассматриваемой как технологический объект управления, представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Основные переменные ЭК1

Параметр	Наименование параметра	Отношение к управлению	Примечание
$Q_{вф1}, Q_{вф2}$	расходы ВФ1, ВФ2	возмущающие воздействия	стабилизируются локальными регуляторами
$Q_{вф3}$	расход ВФ3	возмущающее воздействие	не измеряется
$Q_{вф4}$	расход ВФ4	управляющее воздействие	стабилизируются локальным регулятором
$Q_{оф}$	расход ОФ	возмущающее воздействие	стабилизируются локальным регулятором
$Q_{эк}$	расход экстракта	выходная переменная	не измеряется
$Cu_{вф1} \dots Cu_{вф4}$	концентрации урана в потоках ВФ1...ВФ4	возмущающие воздействия	определяются по результатам химического анализа
$Cu_{раф}$	концентрация урана в рафинате	выходная переменная	определяются по результатам химического анализа
$Cu_{эк}$	концентрация урана в экстракте	выходная переменная	определяются по результатам химического анализа
$\rho_{эк}$	плотность экстракта	выходная переменная	измеряется буйковым плотномером
$Cu_{пм}$	концентрация урана по ПКМ	выходная переменная	измеряется с помощью ПКМ
$L_{здф}^{низ} (L_{зн})$	уровень ЗДФН	управляемая переменная	стабилизируются локальным регулятором
$L_{здф}^{верх} (L_{зв})$	уровень ЗДФВ	выходная переменная	измеряется гидростатическим методом
$L_{пк}$	уровень в пульс-камере	возмущающее воздействие	стабилизируются локальным регулятором
$L_{грф}$	уровень ГРФ	возмущающее воздействие	стабилизируются локальным регулятором

В результате проведенного анализа установки «Утес» по переработке облученного ядерного топлива как объекта управления можно сделать следующие основные выводы:

1. Установка «Утес» представляет собой уникальную установку для переработки облученного ядерного топлива по экстракционной технологии. Уникальность обусловлена: использованием пульсационных колонн, отличающихся от аналогичных аппаратов геометрическими размерами и построением; наличием замкнутой связи по водной фазе между дополнительной промывной и головной колоннами; использованием пульсационных насосов для перекачивания органической фазы из одной колонны в другую и для вывода водной фазы из нижних отстойных зон колонн; использованием гидростатического метода для измерения задержки дисперсной фазы в головной колонне.

2. Результаты анализа технологических переменных показали, что основная цель процесса – извлечение урана и плутония из растворов и при этом содержание плутония в головной колонне существенно меньше, чем урана, и не измеряется в режиме реального времени. В этом случае, очевидно, что основными управляемыми переменными являются концентрация урана в экстракте и рафинате. Концентрация урана в экстракте характеризует количество извлеченного урана, а концентрация в рафинате – остаток.

3. Основные переменные головной колонны, рассматриваемой как технологический объект управления, представлены в табл. 2.3.

4. Процессы, происходящие в головной колонне, и ее режим работы оказывают определяющее влияние на режим работы и качество выходного продукта установки в целом. Режим работы головной колонны определяет главные показатели оптимальной концентрации урана, плутония в экстракте и рафинате, а также уровень γ -излучения в экстракте. Невыполнение заданных требований к главным показателям процесса приводит к дополнительным затратам на повторную переработку экстракта и рафината и к загрязнению органической фазы осколками деления. Для предотвращения нарушений режима необходима современная автоматизированная система управления, включающая эффективные алгоритмы, в первую очередь для управления технологическим процессом в головной колонне.

Таким образом, должны выглядеть выводы по результатам анализа технологической установки по переработке облученного ядерного топлива как объекта управления.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ УРАНА

3.1. Методы моделирования процесса экстракции

В колонных реакторах наибольшее распространение получили следующие методы моделирования [17, 18] процесса экстракции [9, 19, 20]: физическое моделирование (гидравлический метод, теория подобия) и математическое моделирование.

Теория подобия успешно применяется при переходе от лабораторных к промышленным аппаратам, в которых протекают процессы одного класса [9, с. 26]. Однако в химических аппаратах, где протекают тепловые, массообменные, гидродинамические и химические процессы, выполнение гидродинамического подобия несовместимо с одновременным химическим подобием, в результате чего необходимо соблюдать дополнительные практические рекомендации [9]. Поэтому модель должна копировать промышленный аппарат по принципу действия и характеру операций. Конструкция ее может быть аналогичной или близкой промышленному аппарату, но детали можно создавать с некоторой степенью свободы.

Однако моделировать работу крупномасштабного аппарата (например как экстракционная колонна) можно только, если гидравлическая обстановка в нем близка к идеальной. В противном случае используют метод гидравлического моделирования [9]. Определяют отклонение структуры потоков от идеального распределения, т. е. измеряют поперечную неравномерность и продольное перемешивание фаз, размер частиц дисперсной фазы и производительность аппарата. Все это выполняется и для лабораторного реактора (колонны). Сравнив гидравлическую обстановку в лабораторном и испытуемом промышленном аппарате, находят коэффициент масштабного перехода и, зная эффективность лабораторной модели, достаточно достоверно рассчитывают ее для промышленной колонны без проведения технологических опытов.

Принципиальный недостаток этого метода заключается в том, что он не позволяет прогнозировать (или экстраполировать по лабораторным данным) эффективность промышленного аппарата до его изготовления, так как гидравлические измерения надо вести именно на аппарате данного или близкого к нему размера. Иначе говоря, на лабораторной модели нельзя определить коэффициент масштабного перехода и эффективность промышленного аппарата.

Следовательно, в настоящее время нет способа, обеспечивающего надежный переход от данных, полученных при испытании лабораторного или «пилотного» реактора, к данным, характеризующим промышленный аппарат. Более простой выход лежит в области конструктивных разработок, задачей которых является создание реакторов с идеализированной гидродинамикой, описываемой минимальным числом параметров. Одной из таких разработок являются пульсационные колонны с распределительными насадками. Эффективность таких аппаратов может быть определена на лабораторных установках с достаточной точностью.

Метод математического моделирования используют при проектировании ряда процессов химической технологии, но практическая применимость метода для массообменных аппаратов затруднительна вследствие необходимости предварительного определения общего коэффициента массопередачи и коэффициентов продольного и радиального перемешивания в фазах [9, 17]. Поскольку в настоящее время нет надежной методики расчета этих параметров и их приходится определять экспериментально, применение методов математического моделирования для процессов массопередачи ограничивается частными случаями.

В противоточных колоннах, наряду с переносом вещества движущейся жидкостью, существует переход вещества из одной фазы в другую. При этом каждая фаза движется в противоположном направлении по отношению к другой. Процессы, протекающие в противоточных аппаратах, могут быть описаны уравнением однопараметрической диффузионной модели [17]. Уравнения неустановившейся во времени конвективной диффузии с переходом вещества из одной фазы в другую имеют вид [9, 10, с. 36, 21, 22]:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = D_1 \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial h^2} - U_1 \cdot \frac{\partial x}{\partial h} + W, \\ \frac{\partial y}{\partial t} = D_2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial h^2} + U_2 \cdot \frac{\partial y}{\partial h} + W, \end{cases} \quad (3.1)$$

где U_1, U_2 – скорость течения одной и другой фаз; x, y – концентрации компонент; D_1, D_2 – коэффициенты диффузии в соответствующих фазах;

$$W = \beta_1 \cdot \alpha \cdot (x^* - x) = \beta_2 \cdot \alpha \cdot (y - y^*), \quad (3.2)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты массопередачи от одной фазы к другой; α – поверхность соприкосновения двух фаз на единицу объёма; x^*, y^* – равновесные значения концентрации.

Коэффициент диффузии D жидкостей настолько мал, что уже при малых скоростях жидкости конвективный перенос вещества значительно преобладает над молекулярной диффузией. Для упрощения выражения (3.1) обычно пренебрегают членом уравнения, содержащим D :

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = -U_1 \cdot \frac{\partial x}{\partial h} + \beta_1 \cdot \alpha \cdot (x^* - x), \\ \frac{\partial y}{\partial t} = U_2 \cdot \frac{\partial y}{\partial h} + \beta_2 \cdot \alpha \cdot (y - y^*). \end{cases} \quad (3.3)$$

Упрощенное уравнение конвективной диффузии (3.3) – уравнение в частных производных в первом приближении – описывает процессы в противоточных колоннах. Решение таких дифференциальных уравнений подробно представлено в литературе [10, 17, 21, 23, 24, 25].

Например, уравнение (3.3) можно решить методом операционного исчисления [10, с. 38, 17] для любых начальных и граничных условий.

В случае постоянных коэффициентов в (3.3) можно прийти к упрощенной структуре противоточного аппарата [10, с. 39], которая представлена на рис. 3.1.

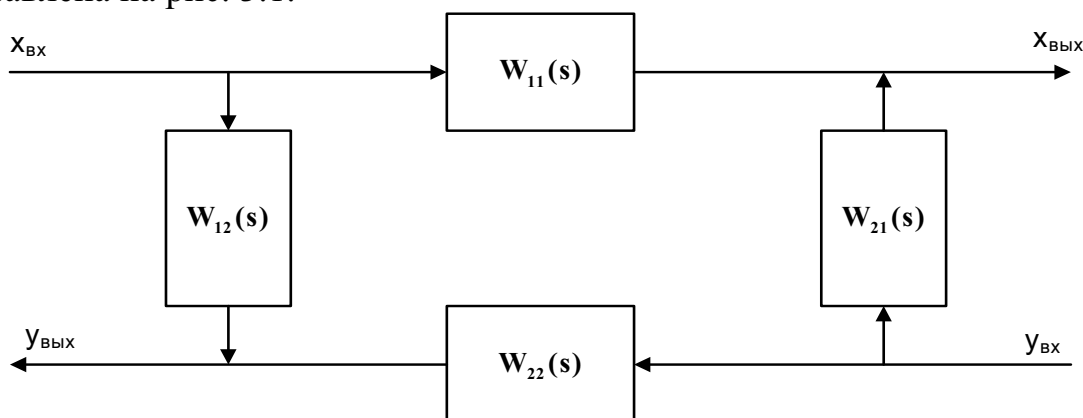


Рис. 3.1. Структурная схема противоточного аппарата

Здесь введены обозначения:

$$W_{11}(s) = \frac{k_{11}e^{-\tau_{11}s}}{T_{11}s + 1}, \quad (3.4)$$

$$W_{12}(s) = \frac{k_{12}}{T_{12}s + 1}, \quad (3.5)$$

$$W_{21}(s) = \frac{k_{21}}{T_{21}s + 1}, \quad (3.6)$$

$$W_{22}(s) = \frac{k_{22}e^{-\tau_{22}s}}{T_{22}s + 1}, \quad (3.7)$$

где s – оператор Лапласа [10, 21].

Значения T_{11} , T_{12} , T_{21} , T_{22} в основном зависят от скоростей потоков в аппарате (расходов), а значения τ_{11} , τ_{22} – от длины аппарата и скоростей потоков.

Уравнения (3.1) и (3.3), а также (3.4)–(3.7) выведены при следующих допущениях: движение жидкости стационарно и ламинарно; градиенты давления и температуры пренебрежимо малы [10, с. 41]. Однако в нашем случае требуется разработать математическую модель, в которой скорости потоков зависят от времени, концентраций урана в фазах, а также от координаты. В результате этого, уравнения (3.1) и (3.3) становятся нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, аналитическое решение которых затруднено [10, 17, 21, 23, 24, 25].

Для решения данной проблемы разработан аналитический метод расчета по ступеням извлечения [10, 26, 27], позволяющий учесть пространственное распределение по высоте колонны. В данном методе экстракционную колонну разбивают на зоны – ступени. В каждой зоне используют дифференциальное уравнение материального баланса. Зоны соединяют между собой последовательно.

Диффузионные процессы в большинстве случаев протекают в противоточных насадочных и тарельчатых колоннах. *Ступенью извлечения* в тарельчатых колоннах принято считать тарелку. При этом имеется в виду, что концентрации по одному из рассматриваемых компонентов встречных потоков, выходящих из тарелки, характеризуются кривой равновесного распределения¹. Такую тарелку обычно принято называть теоретической тарелкой (ТТ) [10, с. 25]. Ступенью извлечения в насадочных колоннах называют участок колонны, на котором устанавливается равновесие, т. е. концентрации по одному из рассматриваемых компонентов встречных потоков, выходящих из этого участка, характеризуется кривой равновесного распределения. Естественно, что участок колонны, на котором устанавливается равновесие, эквивалентен теоретической тарелке [10, с. 26].

В ящичном экстракторе ступенью извлечения будет являться ящичный экстрактор, в котором проходит статическая экстракция. Центробежный экстрактор также можно описать одной ступенью извлечения.

¹ В противоточных колоннах в общем случае происходит динамическая экстракция металла, равновесия по концентрации металла не достигается.

Математическая модель ящичного экстрактора существенно проще модели колонны, так как отсутствует сложная гидродинамика. Его можно описать с помощью модели идеального смешения и метода расчета по ступеням извлечения.

Для построения имитационной модели процессов экстракционной колонны рассмотрим метод расчета по ступеням извлечения. Гидродинамические процессы в колонне будем описывать с использованием результатов исследований С.М. Карпачевой: в каждой ступени рассчитываются объёмы дисперсной и сплошной фаз, диаметры и скорость перемещения капель [9].

3.2. Имитационная модель экстракционной колонны

3.2.1. Принятые допущения

Рассмотрим пример построения имитационной модели колонны на примере головной колонны установки «Утес» РХЗ СХК.

При построении математической модели [18] экстракционной колонны с использованием метода расчета по ступеням извлечения прием следующие допущения:

1. Для сплошной фазы используется модель идеального вытеснения [17, 22, 28]. Расход экстракта ЭК1 равен расходу входной органической фазы.
2. На каждой ступени устанавливается равновесие между содержанием растворенного вещества в обеих фазах [3, 9, 10, 11].
3. Скорость экстракции очень велика, поэтому динамика экстракции не учитывается (равновесие устанавливается мгновенно) [3, 12, 27].
4. Интенсивность пульсаций жидкости одинакова во всех ступенях.
5. Распределение азотной кислоты меняется незначительно, что не приводит к существенному изменению коэффициентов распределения урана.
6. Азотная кислота не переходит в органическую фазу. Коэффициент распределения по кислоте существенно меньше, чем по урану [3, 12], а также содержание кислоты в дисперсной фазе значительно меньше, чем урана.
7. Температура жидкости в колонне постоянна (стабилизируется). Инерционность каналов «температура жидкости в колонне → выходные переменные» существенно выше инерционности других каналов.

Пусть имитационная модель работает в пределах линейного участка равновесной характеристики зависимости концентрации урана в сплошной фазе от концентрации урана в дисперсной фазе. Имитационная модель воспроизводит процессы переноса урана из одной среды в другую. Процессы по плутонию и осколкам деления не моделируются, также не моделируется механический унос органической фазой части дисперсной (так называемые водные уносы).

Зависимость погрешности моделирования (S_M) от количества ступеней извлечения (N) представлена на рис. 3.2.

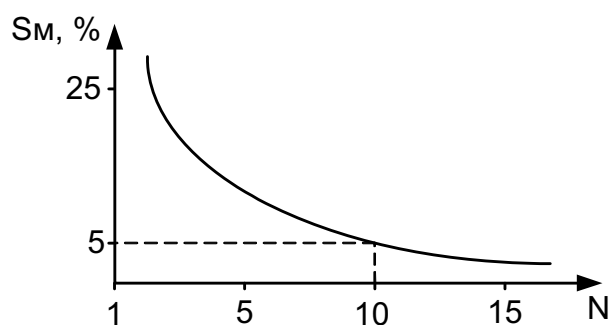


Рис. 3.2

Анализ рис. 3.2 показывает, что увеличение N свыше 10 не дает существенного снижения S_M . Поэтому выбираем 10 ступеней извлечения. В этом случае достигается погрешность моделирования на уровне не более 5 % – вполне достаточном для инженерных расчетов [27, 29].

3.2.2. Модельное распределение урана в колонне

Перемещение урана в модели головной колонны при работе в первом цикле экстракционной очистки представлено на рис. 3.3.

Модель состоит из верхней отстойной зоны (ВОЗ), промывной зоны (1 ступень), экстракционной зоны (2...10 ступени) и нижней отстойной зоны (НОЗ). Параметры зон моделирования представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры зон модели головной колонны

Параметр	ВОЗ	Промывная зона	Экстракционная ступень
Высота L , м	1,3	1,63	0,82
Сечение S , м ²	1,88	1,08	0,66

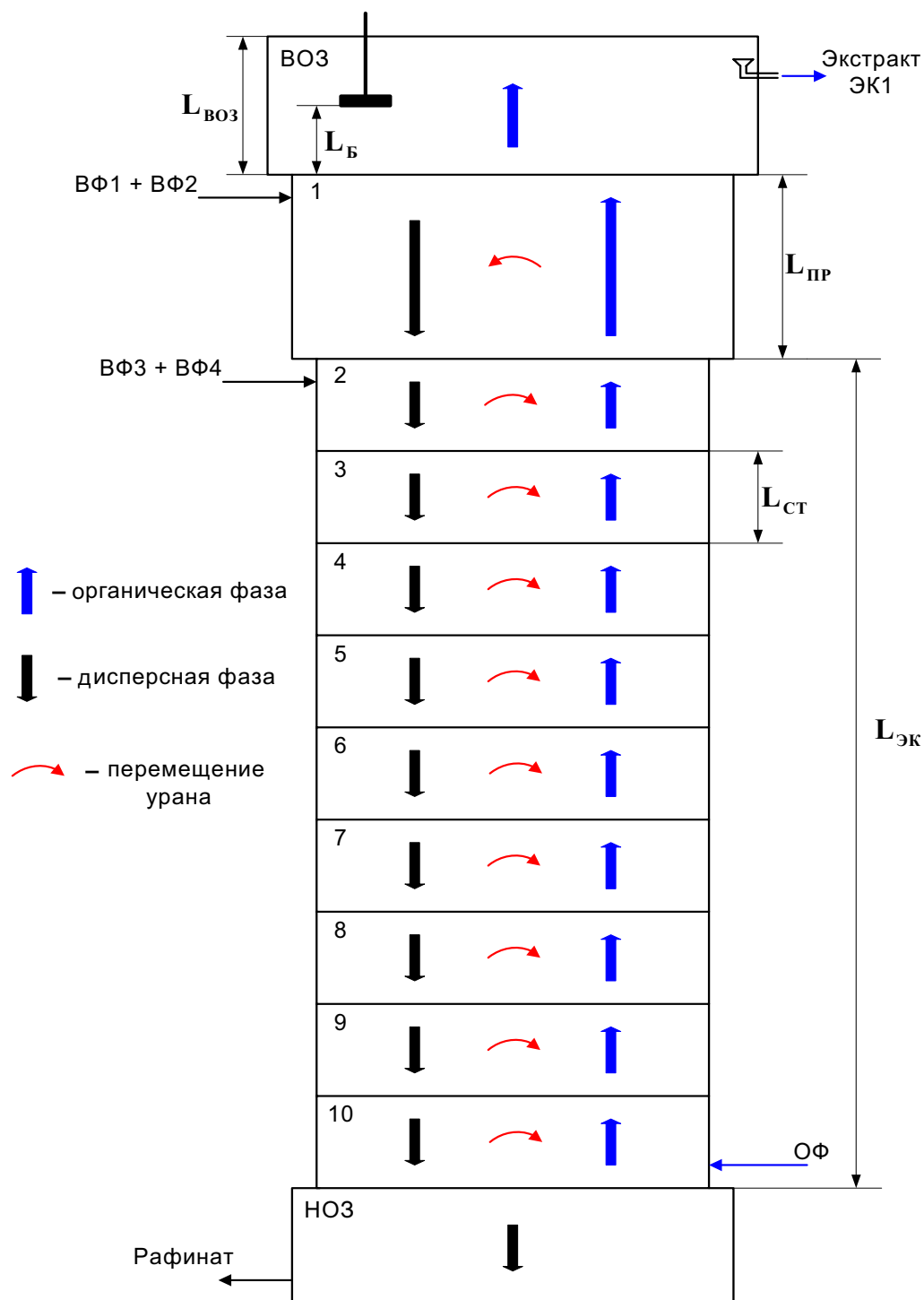


Рис. 3.3. Перемещение урана в модели колонны:
 ВФ1...ВФ4 – водная фаза (табл. 2.1); ОФ – органическая фаза;
 ВОЗ – верхняя отстойная зона; НОЗ – нижняя отстойная зона;
 $L_{ст}$ – высота экстракционной ступени; $L_{эк}$ – высота экстракционной зоны;
 $L_{пр}$ – высота промывной зоны; $L_{воз}$ – высота верхней отстойной зоны;
 L_B – расстояние до точки установки буйки плотномера

3.2.3. Структурная схема экстракционной ступени

Для моделирования процессов экстракции, реэкстракции и промывания (с наличием дисперсной фазы) составим универсальную структуру ступени, которая представлена на рис. 3.4.

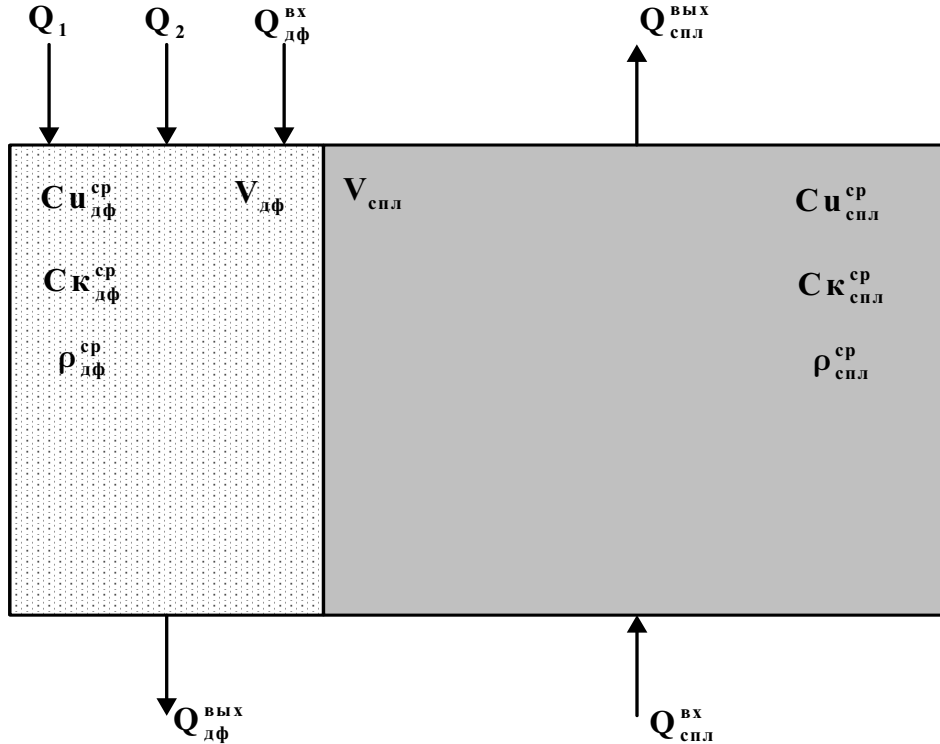


Рис. 3.4. Структурная схема экстракционной ступени:

$Q_1, Q_2, Q_{дф}^{вх}$ – входные расходы дисперсной фазы; $Q_{дф}^{вых}$ – выходной расход дисперсной фазы; $Q_{спл}^{вх}, Q_{спл}^{вых}$ – входной и выходной расходы сплошной фазы; $Cu_{дф}^{ср}, Ck_{дф}^{ср}, Cu_{спл}^{ср}, Ck_{спл}^{ср}$ – средние значения концентрации урана и кислоты в дисперсной и сплошной фазе; $V_{дф}, V_{спл}$ – объём дисперсной и сплошной фазы; $\rho_{дф}^{ср}, \rho_{спл}^{ср}$ – плотность дисперсной и сплошной фазы

В табл. 3.2 представлены обозначения параметров потоков для структурной схемы рис. 3.4.

Таблица 3.2

Обозначения параметров потоков структурной схемы экстракционной ступени

Параметры \ поток	Ед. изм.	Q_1	Q_2	$Q_{дф}^{вх}$	$Q_{дф}^{вых}$	$Q_{спл}^{вх}$	$Q_{спл}^{вых}$
Концентрация урана	кг/м ³	Cu_1	Cu_2	$Cu_{дф}^{вх}$	$Cu_{дф}^{вых}$	$Cu_{спл}^{вх}$	$Cu_{спл}^{вых}$
Концентрация кислоты	кг/м ³	Ck_1	Ck_2	$Ck_{дф}^{вх}$	$Ck_{дф}^{вых}$	$Ck_{спл}^{вх}$	$Ck_{спл}^{вых}$
Плотность	кг/м ³	ρ_1	ρ_2	$\rho_{дф}^{вх}$	$\rho_{дф}^{вых}$	$\rho_{спл}^{вх}$	$\rho_{спл}^{вых}$

К расходам Q_1 и Q_2 добавляются величины соответствующих расходов водных фаз. Например, при моделировании промывной зоны (1-я ступень, рис. 3.3). Расход Q_1 равен объёмному расходу ВФ1, а Q_2 – объёмному расходу ВФ2. При моделировании 2-й ступени (рис. 3.3) расход Q_1 равен объёмному расходу ВФ4, а Q_2 – объёмному расходу ВФ3. В остальных случаях (3–10 ступени) данные расходы равны нулю.

3.2.4. Математическая модель экстракционной ступени

Метод расчета по ступеням извлечения [10, 27] основан на решении дифференциального уравнения материального баланса. Для построения математической модели, описывающей процесс экстракции, требуются два уравнения. В качестве первого берется уравнение материального баланса растворенного вещества, учитывающее его содержание в обеих фазах для каждой стадии. Вторым уравнением является уравнение равновесия [27]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} (Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} \cdot V_{\text{дф}} + Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} \cdot V_{\text{спл}}) = Cu_1 \cdot Q_1 + Cu_2 \cdot Q_2 + \\ + Cu_{\text{дф}}^{\text{ВХ}} \cdot Q_{\text{дф}}^{\text{ВХ}} + Cu_{\text{спл}}^{\text{ВХ}} \cdot Q_{\text{спл}}^{\text{ВХ}} - Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} \cdot Q_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} - Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} \cdot Q_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}}, \\ Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} = K_p \cdot Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (3.8)$$

где K_p – коэффициент равновесного распределения урана (коэффициент распределения) [10, 12, 27], а величину

$$A = \frac{K_p \cdot Q_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}}}{Q_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}}} \quad (3.9)$$

называют коэффициентом разделения [10, 27].

Причем концентрация урана в дисперсной и сплошной фазе на выходе ступени приравнивается средней концентрации урана в дисперсной и сплошной фазе, соответственно, что является источником методической погрешности в данном методе [27]. Данная погрешность уменьшается путем увеличения числа ступеней извлечения (уменьшение объёма жидкости ступени), как показано на рис. 3.2.

Проинтегрировав первое выражение в системе 3.8) и разделив переменные, получаем систему уравнений для описания одной экстракционной ступени (рис. 3.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{V_{\text{дф}}} \cdot \left(\int [Cu_1 \cdot Q_1 + Cu_2 \cdot Q_2 + Cu_{\text{дф}}^{\text{ВХ}} \cdot Q_{\text{дф}}^{\text{ВХ}} + Cu_{\text{спл}}^{\text{ВХ}} \cdot Q_{\text{спл}}^{\text{ВХ}} - \right. \\ \left. - Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} \cdot Q_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} - Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} \cdot Q_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}}] dt - Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} \cdot V_{\text{спл}} \right), \\ Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} = K_p \cdot Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}}. \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Величина концентрации урана $Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}}$ ограничивается на уровне максимальной концентрации $Cu_{\text{спл}}^{\text{макс}}$, которая зависит от конкретного состава органической фазы (разд. 2.3.1).

Средняя концентрация урана в экстракционной ступени определяется из выражения

$$Cu_{\text{ср}} = \frac{Cu_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} \cdot V_{\text{дф}} + Cu_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} \cdot V_{\text{спл}}}{V_{\text{дф}} + V_{\text{спл}}} \quad (\text{кг/м}^3). \quad (3.11)$$

Так как принято допущение, что кислота не переходит в сплошную фазу (в органическую фазу), то материальный баланс по кислоте можно представить интегральным уравнением:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ck_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{V_{\text{дф}}} \cdot \int [Ck_1 \cdot Q_1 + Ck_2 \cdot Q_2 + Ck_{\text{дф}}^{\text{ВХ}} \cdot Q_{\text{дф}}^{\text{ВХ}} - \\ - Ck_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} \cdot Q_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}}] dt \quad (\text{кг/м}^3). \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Причем в данном уравнении принято, что средняя концентрация кислоты в дисперсной фазе равна концентрации кислоты в дисперсной фазе на выходе ступени.

3.2.5. Начальные условия математической модели экстракционной ступени

В рассматриваемой математической модели для сплошной фазы используется модель идеального вытеснения [28, 29] – принятое допущение в разделе 0. Расход экстракта равен расходу входной органической фазы. Причем, это выполняется как для стационарного режима работы, так и для нестационарного. В свою очередь, для объёмных расходов дисперсной фазы в стационарном режиме, когда нет изменения объёма со временем, также применима модель идеального вытеснения. В результате чего для стационарного режима можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{спл}}^{\text{ВЫХ}} = Q_{\text{спл}}^{\text{ВХ}}, \\ Q_{\text{дф}}^{\text{ВЫХ}} = Q_1 + Q_2 + Q_{\text{дф}}^{\text{ВХ}}. \end{array} \right. \quad (3.13)$$

Начальные условия для выражений (3.10), (3.12) можно представить следующим образом:

$$m_u^0 = Cu_{дф}^0 \cdot V_{дф}^0 + Cu_{спл}^0 \cdot V_{спл}^0, \quad (3.14)$$

где m_u^0 – начальная масса урана в экстракционной ступени; $Cu_{дф}^0 = Cu_{дф}^{вых}$ – начальная (стационарная) концентрация урана в дисперсной фазе; $Cu_{спл}^0 = Cu_{спл}^{вых}$ – начальная (стационарная) концентрация урана в сплошной фазе; $V_{дф}^0 = V_{дф}$ – начальный (стационарный) объём дисперсной фазы; $V_{спл}^0 = V_{спл}$ – начальный (стационарный) объём сплошной фазы.

$$m_k^0 = Ck_{дф}^0 \cdot V_{дф}^0, \quad (3.15)$$

где m_k^0 – начальная масса кислоты в экстракционной ступени; $Ck_{дф}^0 = Ck_{дф}^{вых}$ – начальная (стационарная) концентрация кислоты в дисперсной фазе.

Таким образом, для задания стационарных условий необходимо вычислить или задать стационарные значения $Cu_{дф}^{вых}$, $Cu_{спл}^{вых}$, $Ck_{дф}^{вых}$, $V_{дф}$, $V_{спл}$. Определение последних двух будет рассмотрено ниже.

Стационарное значение концентрации кислоты в дисперсной фазе можно вычислить, исходя из материального баланса по кислоте:

$$Ck_1 \cdot Q_1 + Ck_2 \cdot Q_2 + Ck_{дф}^{вх} \cdot Q_{дф}^{вх} - Ck_{дф}^{вых} \cdot Q_{дф}^{вых} = 0, \quad (3.16)$$

откуда выражаем:

$$Ck_{дф}^{вых} = \frac{Ck_1 \cdot Q_1 + Ck_2 \cdot Q_2 + Ck_{дф}^{вх} \cdot Q_{дф}^{вх}}{Q_{дф}^{вых}} \text{ (кг/м}^3\text{)}. \quad (3.17)$$

Стационарные значения концентрации урана в сплошной и дисперсной фазе можно также вычислить исходя из материального баланса по урану:

$$\begin{aligned} Cu_1 \cdot Q_1 + Cu_2 \cdot Q_2 + Cu_{дф}^{вх} \cdot Q_{дф}^{вх} + Cu_{спл}^{вх} \cdot Q_{спл}^{вх} - \\ - Cu_{дф}^{вых} \cdot Q_{дф}^{вых} - Cu_{спл}^{вых} \cdot Q_{спл}^{вых} = 0. \end{aligned} \quad (3.18)$$

В данном случае возможно несколько вариантов, из которых рассмотрим три:

1. В модели задается начальная (стационарная) концентрация урана в сплошной фазе $Cu_{спл}^{вых}$ для каждой ступени, далее вычисляется, на основе выражения (3.18), концентрация урана в дисперсной фазе:

$$Cu_{дф}^{вых} = \frac{Cu_1 \cdot Q_1 + Cu_2 \cdot Q_2 + Cu_{дф}^{вх} \cdot Q_{дф}^{вх} + Cu_{спл}^{вх} \cdot Q_{спл}^{вх} - Cu_{спл}^{вых} \cdot Q_{спл}^{вых}}{Q_{дф}^{вых}}, \quad (3.19)$$

затем определяется коэффициент равновесного распределения

$$K_p = \frac{Cu_{спл}^{вых}}{Cu_{дф}^{вых}}. \quad (3.20)$$

2. В модели задается коэффициент равновесного распределения для каждой ступени, далее, исходя из материального баланса по урану:

$$Cu_1 \cdot Q_1 + Cu_2 \cdot Q_2 + Cu_{дф}^{вх} \cdot Q_{дф}^{вх} + Cu_{спл}^{вх} \cdot Q_{спл}^{вх} - Cu_{дф}^{вых} \cdot Q_{дф}^{вых} - K_p \cdot Cu_{дф}^{вых} \cdot Q_{спл}^{вых} = 0, \quad (3.21)$$

вычисляется концентрация урана в дисперсной фазе

$$Cu_{дф}^{вых} = \frac{Cu_1 \cdot Q_1 + Cu_2 \cdot Q_2 + Cu_{дф}^{вх} \cdot Q_{дф}^{вх} + Cu_{спл}^{вх} \cdot Q_{спл}^{вх}}{Q_{дф}^{вых} + K_p \cdot Q_{спл}^{вых}}, \quad (3.22)$$

затем вычисляется концентрация урана в сплошной фазе через заданный коэффициент равновесного распределения:

$$Cu_{спл}^{вых} = K_p \cdot Cu_{дф}^{вых}. \quad (3.23)$$

3. Если в экстракционной ступени ОФ насыщается до максимальной величины $Cu_{спл}^{макс}$, то необходимо задавать равновесный коэффициент K_p и концентрацию урана $Cu_{спл}^{вых}$ на уровне $Cu_{спл}^{макс}$.

3.2.6. Расчет средней скорости погружения дисперсной фазы

Для вычисления $V_{дф}$ и $V_{спл}$, а также времени пребывания дисперсной фазы в экстракционной ступени $\tau_3^{дф}$ и $Q_{дф}^{вых}$ при нестационарном режиме первоначально необходимо рассчитать среднюю скорость погружения дисперсной фазы в экстракционной ступени.

Для инженерных расчетов для пульсационных колонн с насадками типа КРИМЗ можно воспользоваться следующей эмпирической формулой [9, 30, 31]:

$$\overline{U}_k = 22 \cdot \left(\frac{\rho_c}{\mu_c} \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c} \right)^{0,66} \cdot \overline{d}_k \quad (\text{мм/с}), \quad (3.24)$$

где \overline{d}_k – средний диаметр капли, см; \overline{U}_k – средняя скорость движения капель, мм/с; ρ_c – плотность сплошной фазы, г/см³,

$$\Delta\rho = \rho_{дф} - \rho_c - \quad (3.25)$$

разность плотностей, г/см³; μ_c – динамическая вязкость сплошной фазы, сП.

Типовое значение динамической вязкости сплошной фазы $\mu_c = 1.2 \text{ сП} = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ (при температуре около 40 °С).

Динамическая вязкость сплошной фазы (как и дисперсной) зависит от температуры. По экспериментальным данным РХЗ коэффициент связи

$$K_\mu^T = \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{0,85 - 1,61}{60 - 20} = -0,019 \quad (\text{сП/}^\circ\text{С}). \quad (3.26)$$

Из данного выражения следует необходимость термостатирования колонны.

Средний диаметр капель для выражения (3.24) определяется по формуле [9, 30, 31]:

$$\bar{d}_k = 1.35 \cdot 10^{-1} \cdot F \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{0.6} \cdot (f \cdot a)^{-1} \text{ (мм)}, \quad (3.27)$$

где f – частота пульсаций столба жидкости в колонне, мин^{-1} ; a – двойная амплитуда пульсаций столба жидкости, см; σ – межфазное поверхностное натяжение, дн/см ; ρ_c – плотность сплошной фазы, г/см^3 ;

$$F = N_{\text{отв}} \cdot (b_{\text{отв}})^2 \cdot \sin \alpha (2 + \cos \alpha) \text{ (см}^2\text{)}, \quad (3.28)$$

где F – проходное (свободное) сечение насадки, см^2 ; $N_{\text{отв}} = 250$ – число отверстий в насадке; $b_{\text{отв}} = 1,7$ – ширина отверстия в насадке, см; $\alpha = 45$ – угол наклона лопаток насадки, град.

При нормальном режиме работы экстракционной ступени межфазное поверхностное натяжение находится в диапазоне [9]:

$$\sigma = 18 \div 24 \text{ (дн/см)} = (18 \div 24) \cdot 10^{-3} \text{ (Н/м)}. \quad (3.29)$$

Для установки «Утес» частота пульсаций и двойная амплитуда пульсаций столба жидкости составляет [3]:

$$\begin{cases} f = 100 \text{ (мин}^{-1}\text{)}, \\ a \approx 2 \text{ (см)}. \end{cases} \quad (3.30)$$

Амплитуда пульсаций столба жидкости зависит от режима работы пульс-камеры.

3.2.7. Расчет объёмов дисперсной и сплошной фаз

Текущие объёмы $V_{\text{дф}}(t)$ и $V_{\text{спл}}(t)$ необходимы для решения интегральных уравнений (3.10) и (3.12), а также для определения расхода дисперсной фазы на выходе экстракционной ступени.

Определим начальное соотношение фаз и объёмов при стационарном режиме работы колонны. Начальное соотношение фаз (K_{ϕ}^0) для рассматриваемой экстракционной ступени можно определить следующим образом:

$$K_{\phi}^0 = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_{\text{дф}}^{\text{вх}}}{Q_{\text{спл}}^{\text{вх}}} = \frac{Q_{\text{дф}}^{\text{вых}}}{Q_{\text{спл}}^{\text{вых}}} = \frac{V_{\text{дф}}^0}{V_{\text{спл}}^0}. \quad (3.31)$$

Далее вычисляется начальный объём дисперсной и сплошной фазы:

$$\begin{cases} V_{\text{дф}}^0 = \frac{K_{\text{ф}}^0 \cdot V_{\text{эс}}}{1 + K_{\text{ф}}^0}, \\ V_{\text{спл}}^0 = V_{\text{эс}} - V_{\text{дф}}^0 \text{ (м}^3\text{)}, \end{cases} \quad (3.32)$$

где $V_{\text{эс}}$ – объём экстракционной ступени по жидкости (разд. 3.2.2), м³.

Определим среднее время задержки дисперсной фазы в экстракционной ступени ($\tau_3^{\text{дф}}$):

$$\tau_3^{\text{дф}} = \frac{L_{\text{ст}}}{U_{\kappa}} \text{ (с)}. \quad (3.33)$$

Для определения расхода на выходе экстракционной ступени и объёма дисперсной фазы можно воспользоваться двумя способами:

1. Первый способ заключается в решении следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} Q_{\text{дф}}^{\text{ввых}}(t) = Q_{\text{дф}}^{\text{вх}}(t - \tau_3^{\text{дф}}), \\ V_{\text{дф}}(t) = \int (Q_1(t) + Q_2(t) + Q_{\text{дф}}^{\text{вх}}(t) - Q_{\text{дф}}^{\text{ввых}}(t)) dt, \\ V_{\text{спл}}(t) = V_{\text{эс}} - V_{\text{дф}}(t). \end{cases} \quad (3.34)$$

2. Второй способ заключается в решении системы уравнений, построенной на основе определения объёмного расхода (произведение скорости на сечение):

$$\begin{cases} S_{\text{дф}}(t) = \frac{V_{\text{дф}}(t)}{L_{\text{ст}}}, \\ Q_{\text{дф}}^{\text{ввых}}(t) = \overline{U_{\kappa}}(t) \cdot S_{\text{дф}}(t), \\ V_{\text{дф}}(t) = \int (Q_1(t) + Q_2(t) + Q_{\text{дф}}^{\text{вх}}(t) - Q_{\text{дф}}^{\text{ввых}}(t)) dt, \\ V_{\text{спл}}(t) = V_{\text{эс}} - V_{\text{дф}}(t). \end{cases} \quad (3.35)$$

Начальные условия для решения перечисленных систем находятся из выражений (3.31) и (3.32).

Исследование на модели влияния амплитуды пульсаций жидкости в колонне на другие параметры показало, что модель со вторым способом более точно описывает экстракционную колонну.

3.2.8. Расчет плотностей в экстракционной ступени

Плотность дисперсной фазы зависит от концентрации урана и кислоты. Величину плотности можно рассчитать с помощью следующей формулы на основе аддитивности свойств компонент [12]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{дф}} &= 1000 \cdot \left(0,998 + 0,318 \cdot \frac{Cu_{\text{дф}}}{M_{\text{ун}}} + 0,0326 \cdot \frac{Ck_{\text{дф}}}{M_{\text{к}}} \right) = \\ &= 1000 \cdot \left(0,998 + 0,318 \cdot \frac{Cu_{\text{дф}}}{394} + 0,0326 \cdot \frac{Ck_{\text{дф}}}{63} \right), \text{ г/л (кг/м}^3\text{)}, \end{aligned} \quad (3.36)$$

где $M_{\text{ун}} = 394$ г/моль – молярная масса уранилнитрата; $M_{\text{к}} = 63$ г/моль – молярная масса кислоты; $Cu_{\text{дф}}$, $Ck_{\text{дф}}$ – объёмная концентрация урана и кислоты в дисперсной фазе, г/л (кг/м³).

Величину плотности сплошной фазы (с учетом допущения, что азотная кислота не переходит в ОФ) можно рассчитать по следующей экспериментальной формуле:

$$\rho_{\text{спл}} = \rho_{\text{оф}}^0 + K_{\text{оф}} \cdot Cu_{\text{спл}} = 800 + 1,263 \cdot Cu_{\text{спл}}, \text{ г/л (кг/м}^3\text{)}, \quad (3.37)$$

где $\rho_{\text{оф}}^0 = 800$ г/л – плотность органической фазы, не содержащей уран, плутоний и осколки деления; $Cu_{\text{спл}}$ – концентрация урана в сплошной фазе, г/л; $K_{\text{оф}} = 1,263$ – экспериментальный коэффициент.

Расчет средней плотности жидкости в экстракционной ступени определяется следующим образом:

$$\rho_{\text{ст}}^{\text{ср}} = \frac{\rho_{\text{дф}} \cdot V_{\text{дф}} + \rho_{\text{спл}} \cdot V_{\text{спл}}}{V_{\text{дф}} + V_{\text{спл}}}, \text{ г/л (кг/м}^3\text{)}. \quad (3.38)$$

Средняя плотность жидкости в экстракционной ступени необходима для определения средней плотности жидкости в колонне, а также для вычисления ЗДФН и ЗДФВ (разд. 2.3.4).

3.2.9. Модель верхней отстойной зоны

Модель верхней отстойной зоны (ВОЗ) рассматриваемой ЭК заключается в зависимости концентрации урана в экстракте и его плотности от концентрации урана в сплошной фазе на выходе первой ступени. Сплошная фаза, всплывая со скоростью $\overline{U}_{\text{спл}}$, проходит расстояние $L_{\text{б}}$ до измерителя плотности – буйка (рис. 3.3). В результате чего показания измерителя плотности отстают от плотности сплошной фазы в промывной ступени на время всплытия $\tau_3^{\text{б}}$.

Таким образом, получаем выражение для вычисления плотности экстракта (с использованием модели идеального вытеснения для вычисления скорости всплытия ОФ в ВОЗ [28, 29]):

$$\begin{cases} \tau_3^{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{U_{\text{спл}}} = \frac{L_{\text{б}} \cdot S_{\text{воз}}}{Q_{\text{спл}}}, \\ \rho_{\text{эк}} = \rho_{\text{спл}}^{\text{пр}}(t - \tau_3^{\text{б}}), \end{cases} \quad (3.39)$$

где $\rho_{\text{эк}}$ – плотность экстракта, кг/м^3 ; $\rho_{\text{спл}}^{\text{пр}}$ – плотность сплошной фазы на выходе промывной зоны, кг/м^3 ; $Q_{\text{спл}}$ – расход сплошной фазы (расход ОФ), $\text{м}^3/\text{с}$; $L_{\text{б}} = 0,73$ м – высота установки буйка плотности экстракта, м; $S_{\text{воз}}$ – сечение ВОЗ по жидкости, м^2 (разд. 3.2.2). В свою очередь, показание прибора, установленного на ЭК1, будет определяться выражением:

$$\rho_{\text{эк}}^{\text{пр}} = \rho_{\text{эк}} - 880 (\%), \quad (3.40)$$

где $\rho_{\text{эк}}^{\text{пр}}$ – плотность экстракта по прибору, %; $\rho_{\text{эк}}$ – реальная плотность экстракта, кг/м^3 .

С другой стороны, концентрация урана в экстракте, в точке установки буйка, определяется аналогично:

$$\begin{cases} \tau_3^{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{U_{\text{спл}}} = \frac{L_{\text{б}} \cdot S_{\text{воз}}}{Q_{\text{спл}}}, \\ Cu_{\text{эк}} = Cu_{\text{спл}}^{\text{пр}} (t - \tau_3^{\text{б}}), \end{cases} \quad (3.41)$$

где $Cu_{\text{эк}}$ – концентрация урана в экстракте колонны (в точке установки буйка), кг/м^3 ; $Cu_{\text{спл}}^{\text{пр}}$ – концентрация урана в сплошной фазе на выходе промывной зоны, кг/м^3 . На выходе из колонны задержка, соответственно, выше и рассчитывается аналогично.

3.2.10. Вычисление ЗДФН и ЗДФВ

Среднюю плотность столба жидкости $\rho_{\text{ср}}^{\text{низ}}$ высотой $h_{\text{сж}}^{\text{низ}}$ (разд. 2.3.4) можно определить по следующему выражению:

$$\rho_{\text{ср}}^{\text{низ}} = \frac{\rho_{\text{воз}} \cdot V_{\text{воз}} + \rho_1 \cdot V_{\text{пр}} + V_{\text{эк}} \cdot \sum_{i=2}^{10} \rho_i}{V_{\text{воз}} + V_{\text{пр}} + 9 \cdot V_{\text{эк}}} \quad (\text{кг/м}^3), \quad (3.42)$$

где $V_{\text{воз}} = S_{\text{воз}} \cdot L_{\text{воз}}$ – объём ВОЗ, м^3 ; $V_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} \cdot L_{\text{пр}}$ – объём промывной зоны, м^3 ; $V_{\text{эк}} = S_{\text{эк}} \cdot L_{\text{эк}}$ – объём экстракционной зоны, м^3 (табл. 3.1); ρ_i – средняя плотность жидкости в i -й экстракционной ступени, кг/м^3 ; $\rho_{\text{воз}}$ – плотность жидкости в ВОЗ, кг/м^3 . Среднюю плотность жидкости в ВОЗ можно определить по следующему выражению:

$$\rho_{\text{воз}} = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{\text{эк}} + \rho_{\text{спл}}^{\text{пр}}), \quad \text{кг/м}^3. \quad (3.43)$$

Средняя плотность столба жидкости $\rho_{\text{ср}}^{\text{верх}}$ высотой $h_{\text{сж}}^{\text{верх}}$ определяется аналогично (используется 5 ступеней):

$$\rho_{\text{ср}}^{\text{верх}} = \frac{\rho_{\text{воз}} \cdot V_{\text{воз}} + \rho_1 \cdot V_{\text{пр}} + V_{\text{эк}} \cdot \sum_{i=2}^5 \rho_i}{V_{\text{воз}} + V_{\text{пр}} + 4 \cdot V_{\text{эк}}} \quad (\text{кг/м}^3). \quad (3.44)$$

В свою очередь, величины ЗДФН и ЗДФВ (разд. 2.3.4) можно вычислить по выражениям (2.11) и (2.12):

$$L_{\text{здф}}^{\text{низ}} = 0,73 \cdot \rho_{\text{ср}}^{\text{низ}} - 588 - 58,8 \cdot h_{\text{см}}^{\text{низ}} \quad (\%), \quad (3.45)$$

$$L_{\text{здф}}^{\text{верх}} = 0,51 \cdot \rho_{\text{ср}}^{\text{верх}} - 409 - 62,5 \cdot h_{\text{см}}^{\text{верх}} \quad (\%), \quad (3.46)$$

где $h_{\text{см}}^{\text{низ}}$, $h_{\text{см}}^{\text{верх}}$ – смещение шкалы уровнемера (баланс нуля), м.

3.2.11. Структура имитационной модели экстракционной колонны

Структурная схема имитационной модели процесса экстракции урана во всей колонне представлена на рис. 3.5, схема решения системы уравнений (3.10), описывающей процессы экстракции урана в одной ступени, – на рис. 3.6.

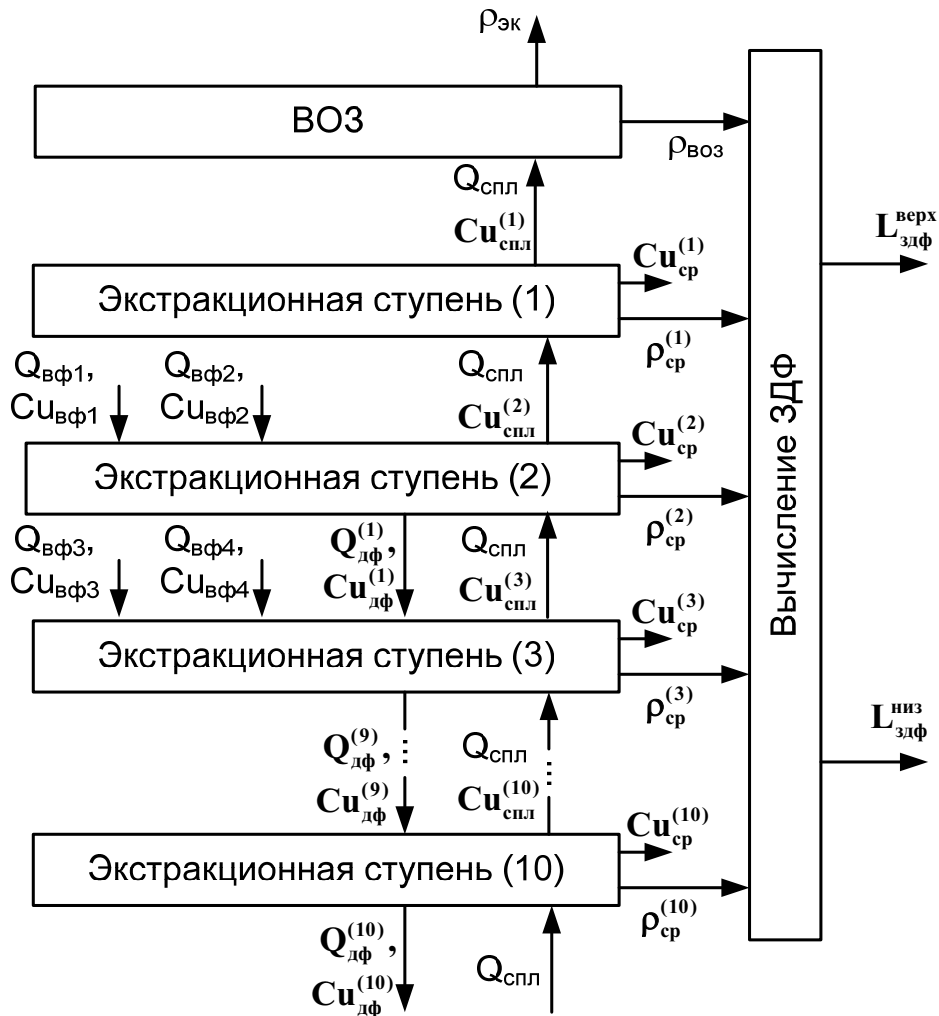


Рис. 3.5. Структурная схема имитационной модели процесса экстракции урана в колонне

При моделировании процессов, проходящих в экстракционной колонне, элементы структурной схемы имитационной модели обсчитываются последовательно на каждой итерации: ВОЗ (разд. 3.2.9), промывная зона (экстракционная ступень 1), экстракционная ступень 2... экстракционная ступень 10 (разд. 3.2.4), вычисление уровня ЗДФН и ЗДФВ (разд. 3.2.10). Информационные связи между этими элементами проиллюстрированы на рис. 3.5.

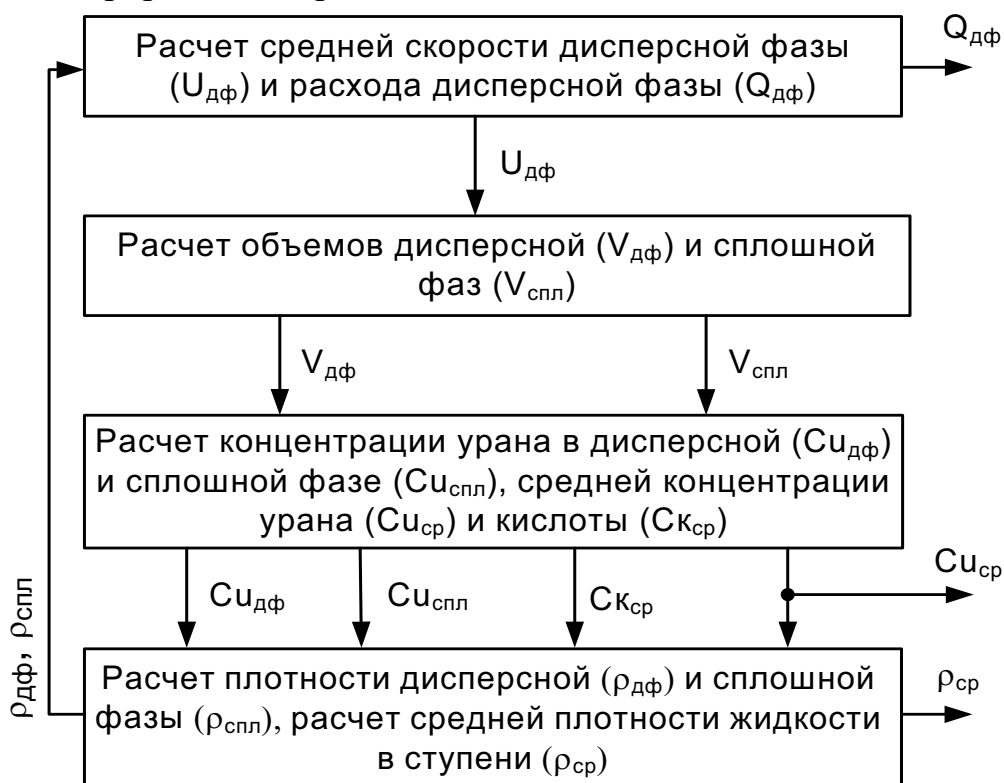


Рис. 3.6. Схема модели экстракционной ступени

Последовательность вычислений при моделировании экстракционных ступеней и промывной зоны, выполняемые на каждой итерации (рис. 3.6):

1. Расчет средней скорости погружения дисперсной фазы (разд. 3.2.6).
2. Расчет объемов дисперсной и сплошной фазы (разд. 3.2.7).
3. Расчет концентрации урана в дисперсной и сплошной фазе, средней концентрации урана и концентрации кислоты (разд. 3.2.4).
4. Расчет плотности дисперсной и сплошной фазы, расчет средней плотности жидкости в ступени (разд. 3.2.8).

При расчете средней скорости погружения дисперсной фазы, величины плотности дисперсной и сплошной фаз берутся из предыдущей итерации моделирования.

Перед началом моделирования экстракционной колонны выполняется инициализация начальных значений концентраций урана и кислоты, объемов дисперсной и сплошной фазы (разд. 3.2.5).

Компьютерная² модель экстракционной колонны может быть построена в программном пакете *MATLAB* 6.5 [32] в его расширении *Simulink* 4 [32, 33]. Данный программный продукт позволяет очень быстро строить имитационные модели и производить моделирование, а также становится неотъемлемым инструментом современного инженера [34, 35, 36].

На рис. 3.7 представлена структурная схема подсистемы расчета концентрации урана в дисперсной и сплошной фазах экстракционной ступени, которую можно реализовать в пакете *Simulink*. Указанный способ позволяет выполнить решение нелинейного дифференциального уравнения в системе (3.8).

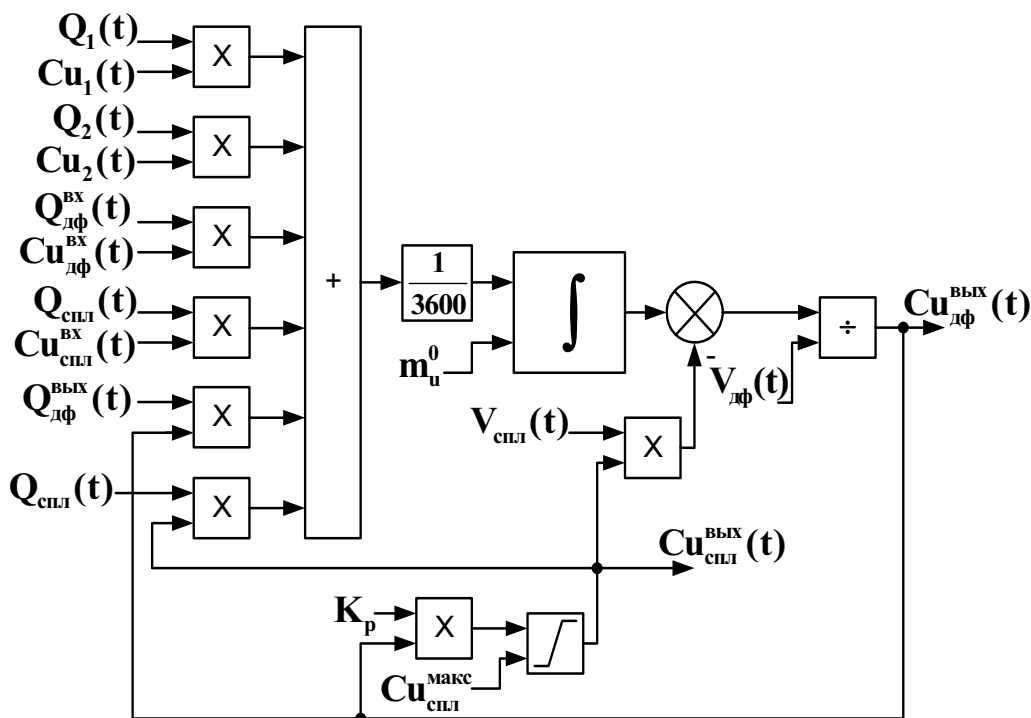


Рис. 3.7. Структурная схема подсистемы расчета концентрации урана в дисперсной и сплошной фазах экстракционной ступени

На рис. 3.8 представлена структурная схема подсистемы расчета концентрации азотной кислоты в дисперсной фазе экстракционной ступени. Указанный способ позволяет решать нелинейное интегральное уравнение (3.12) в пакете *Simulink*.

² В данном случае под компьютерной моделью понимается имитационная модель, реализованная на персональном компьютере с использованием современных программных средств на примере пакета *MATLAB* [37].

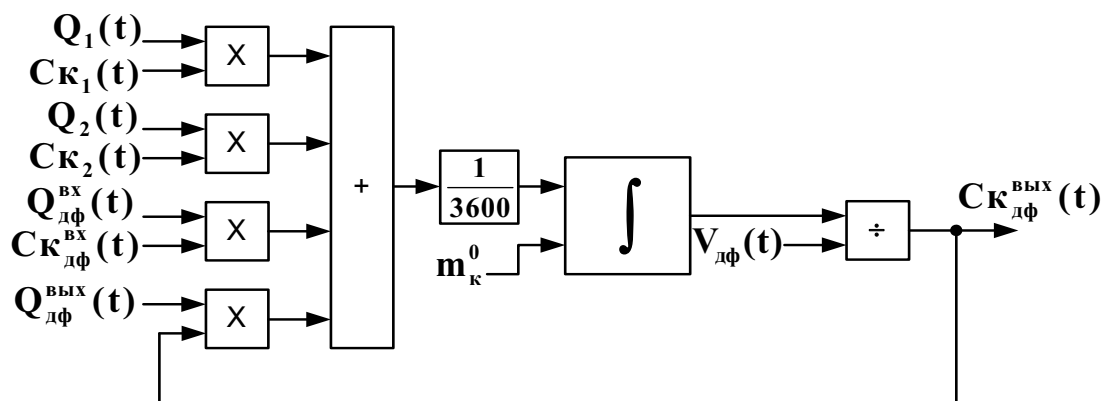


Рис. 3.8. Структурная схема подсистемы расчета концентрации кислоты в дисперсной фазе экстракционной ступени

Пример компьютерной модели процесса массопереноса в экстракционной колонне, выполненной в пакете *Simulink*, представлен на рис. 3.9.

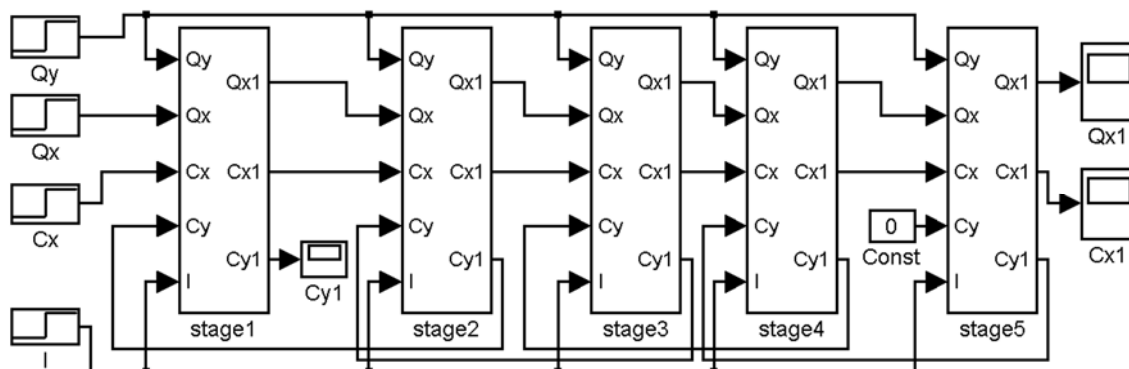


Рис. 3.9. Компьютерная модель экстракционной колонны:
 Q_x , Q_y – расход дисперсной и сплошной сред; C_x , C_y – концентрация переносимого вещества в дисперсной и сплошной средах; I – интенсивность пульсации среды

Однотипные подсистемы stage1 ÷ stage5 (рис. 3.9) используются для моделирования экстракционных ступеней. В них численным методом, например *Ode45*, с помощью визуального моделирования пакета *Simulink*, решается система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая процесс массопереноса [32, 33].

Таким образом, пакет *Matlab/Simulink* позволяет проводить исследования сложных динамических объектов – экстракционных процессов с массопереносом. При этом существенно сокращается время на разработку математических моделей.

4. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для проверки адекватности математической модели реальному объекту управления необходимо:

1. Выбрать наиболее значимые контролируемые переменные и управляющие воздействия.
2. Снять серию экспериментов на исследуемой установке для получения временных зависимостей выбранных контролируемых переменных, при ступенчатых изменениях выбранных управляющих воздействий.
3. Выполнить серию вычислительных экспериментов на разработанной компьютерной модели (аналогично п. 2).
4. Рассчитать дисперсию адекватности модели [38].
5. Выполнить проверку адекватности математической модели, например по критерию Фишера [38].

Рассмотрим проверку адекватности на примере математической модели головной колонны установки «Утес» РХЗ СХК.

Для проверки адекватности разработанной математической модели реальному объекту на установке «Утес» сотрудниками РХЗ СХК и кафедры «Электроника и автоматика физических установок» были произведены ряд экспериментов в штатном режиме работы в первом цикле экстракционной очистки, из них рассмотрим следующие: ступенчатое изменение расхода ВФ4 и ступенчатое изменение расхода ОФ. Обоснованием такого выбора является то, что расходы ОФ и ВФ4 наиболее существенно влияют на контролируемые переменные.

Целью экспериментов ступенчатого изменения расходов ОФ и ВФ4 является исследование временных характеристик зависимостей контролируемых переменных колонны от указанных выше расходов. Полученные в результате экспериментов переходные процессы позволяют оценить временные характеристики и сравнить их с временными характеристиками таких же зависимостей имитационной модели.

Эксперимент по ступенчатому изменению расхода ВФ4 проводился в штатном режиме работы установки. На рис. 4.1 и 4.2 представлены временные диаграммы относительного расхода ВФ4 ($Q_{вф4}/Q_n$), где Q_n – начальное значение расхода ВФ4 и плотности экстракта (ρ). На рис. 4.3 и 4.4 представлены временные диаграммы ЗДФН и ЗДФВ, соответственно.

Среднеквадратичная погрешность между моделью и реальной установкой, приведенная к шкале прибора по плотности экстракта, составила $S_\rho = 0,37 \%$; по ЗДФН $S_{зн} = 0,3 \%$; по ЗДФВ $S_{зв} = 0,7 \%$. В ре-

зультате чего, суммарная погрешность в данном эксперименте составила [39, 40, 41]:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \sqrt{(S_\rho)^2 + (S_{3H})^2 + (S_{3B})^2} = \\
 &= \sqrt{(0,37)^2 + (0,3)^2 + (0,7)^2} \approx 0,85 (\%).
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

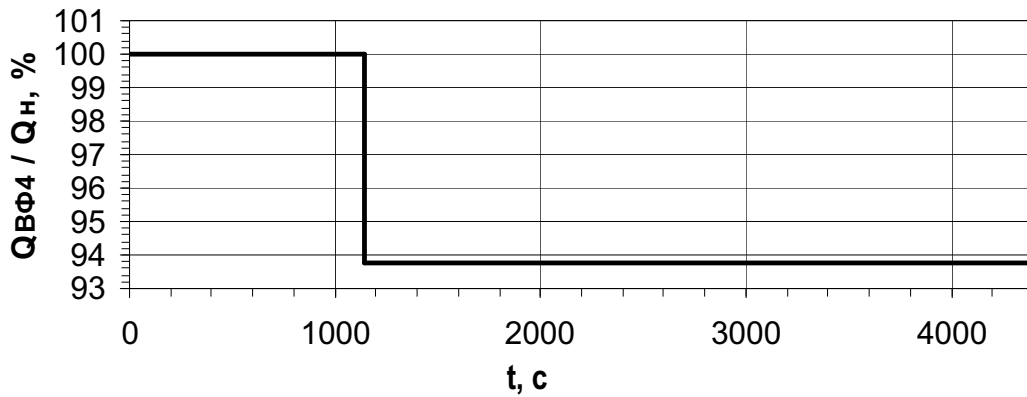


Рис. 4.1. Временная диаграмма относительного расхода ВФ4:
 Q_n – начальное значение расхода ВФ4

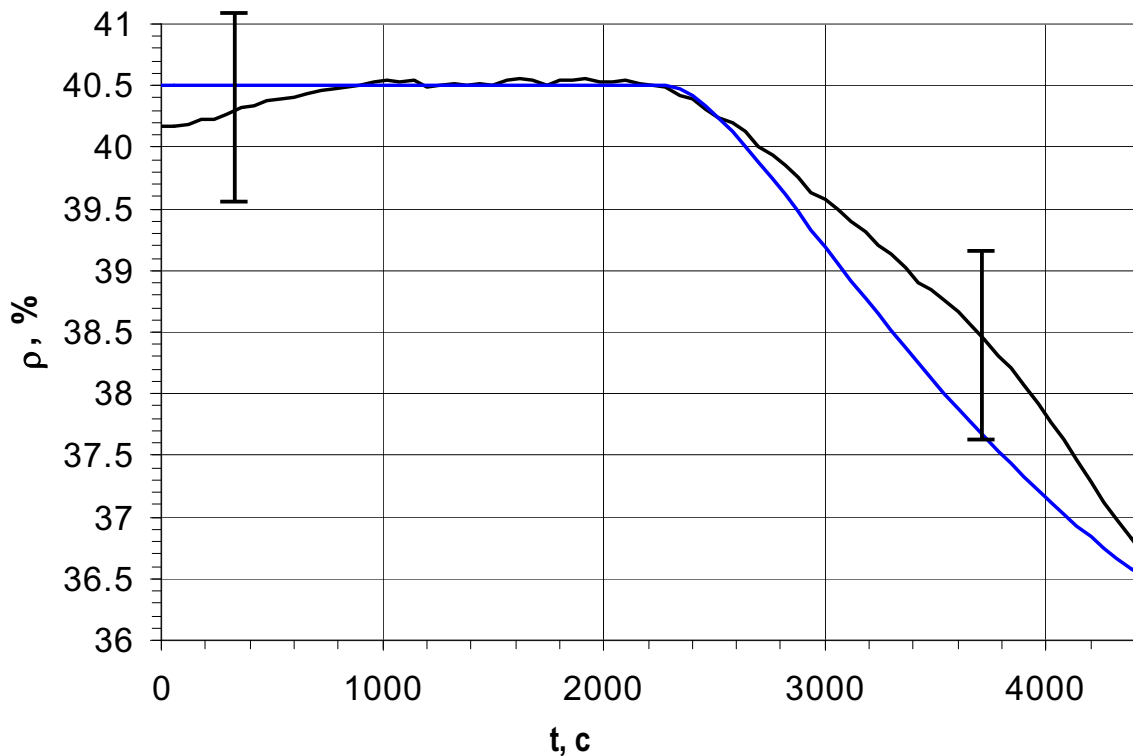


Рис. 4.2. Временная диаграмма плотности экстракта:
 — установка «Утес»; — модель

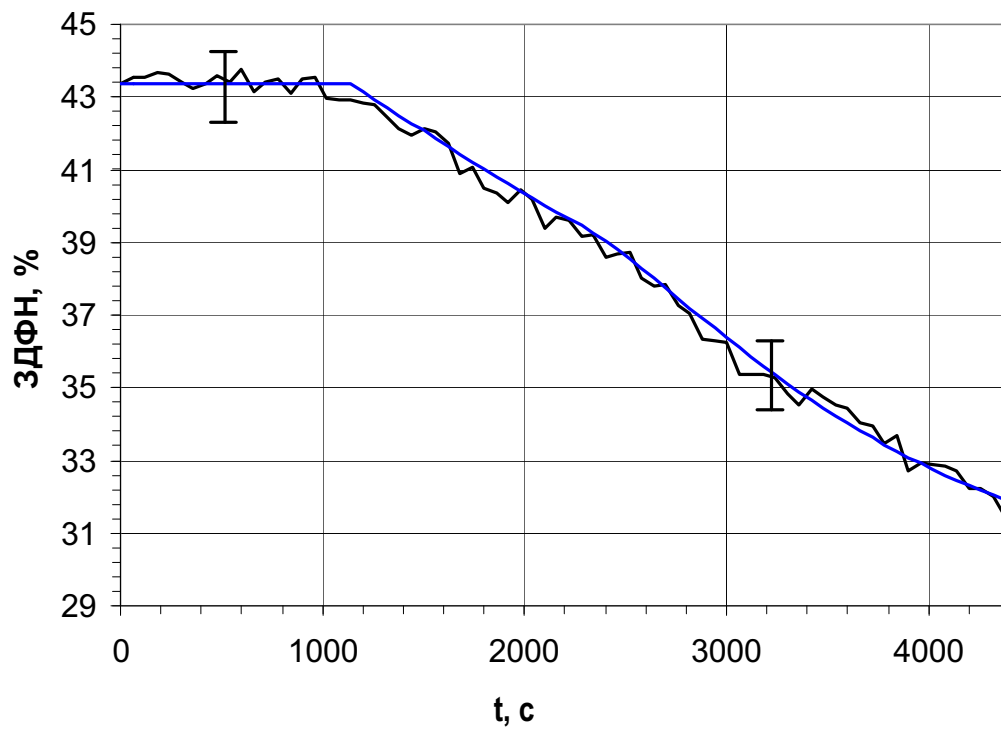


Рис. 4.3. Временная диаграмма ЗДФН:
 — установка «Утес»; — модель

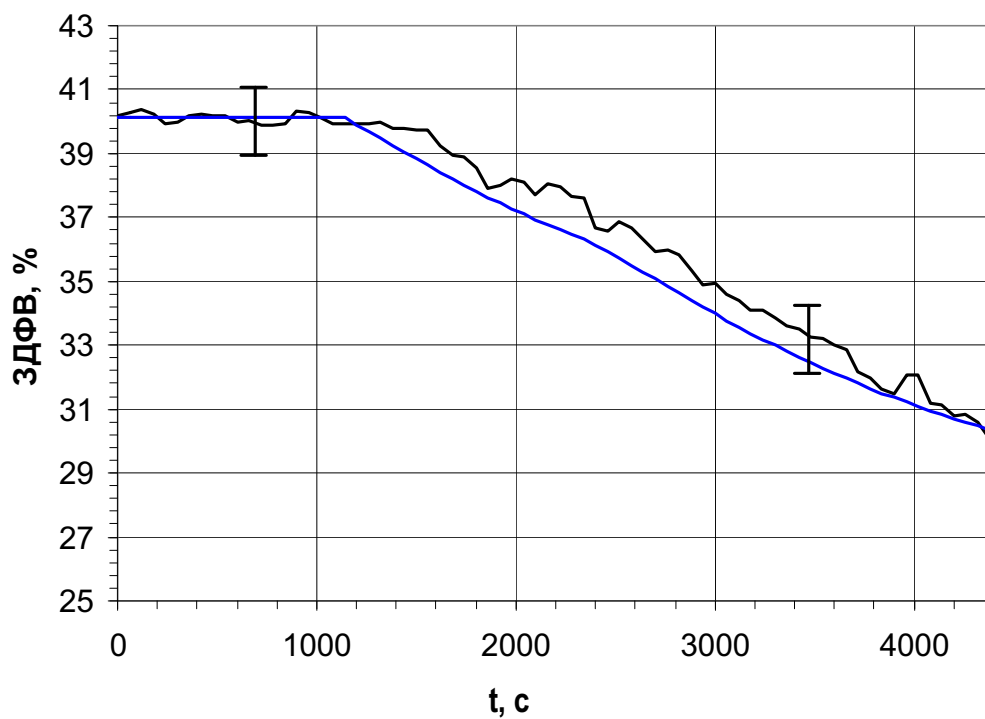


Рис. 4.4. Временная диаграмма ЗДФВ:
 — установка «Утес»; — модель

Эксперимент по ступенчатому изменению расхода ОФ проводился в штатном режиме работы установки. На рис. 4.5 и 4.6 представлены временные диаграммы относительного расхода ОФ ($Q_{\text{оф}}/Q_{\text{н}}$), где $Q_{\text{н}}$ – начальное значение расхода ОФ и плотности экстракта (ρ). На рис. 4.7 и 4.8 представлены временные диаграммы ЗДФН и ЗДФВ, соответственно.

Среднеквадратичная погрешность между моделью и реальной установкой, приведенная к шкале прибора, по плотности экстракта составила $S_{\rho} = 0,46\%$, по величине ЗДФН – $S_{\text{ЗН}} = 0,73\%$, по величине ЗДФВ – $S_{\text{ЗВ}} = 1,39\%$. В результате чего, суммарная погрешность в данном эксперименте составила [39, 40, 41]:

$$S_2 = \sqrt{(S_{\rho})^2 + (S_{\text{ЗН}})^2 + (S_{\text{ЗВ}})^2} = \sqrt{(0,46)^2 + (0,73)^2 + (1,39)^2} \approx 1,64(\%) \quad (4.2)$$

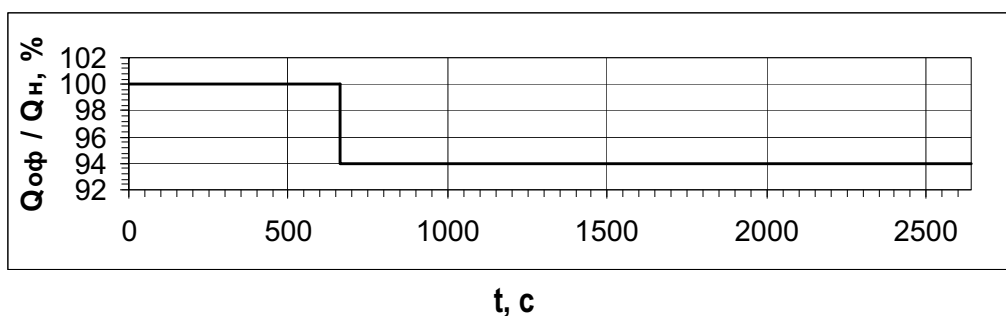


Рис. 4.5. Временная диаграмма относительного расхода ОФ: $Q_{\text{н}}$ – начальное значение расхода ОФ

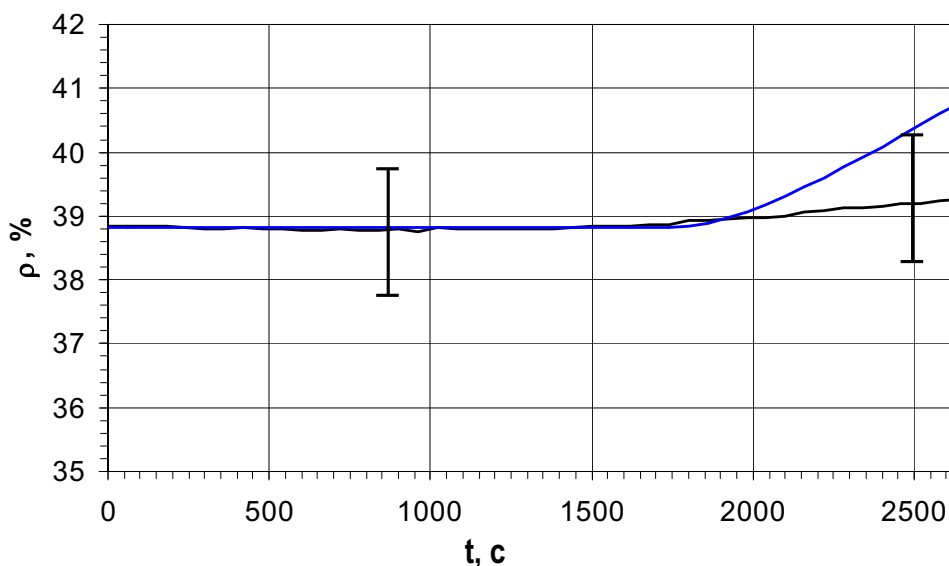


Рис. 4.6. Временная диаграмма плотности экстракта:
 — установка «Утес»; — модель

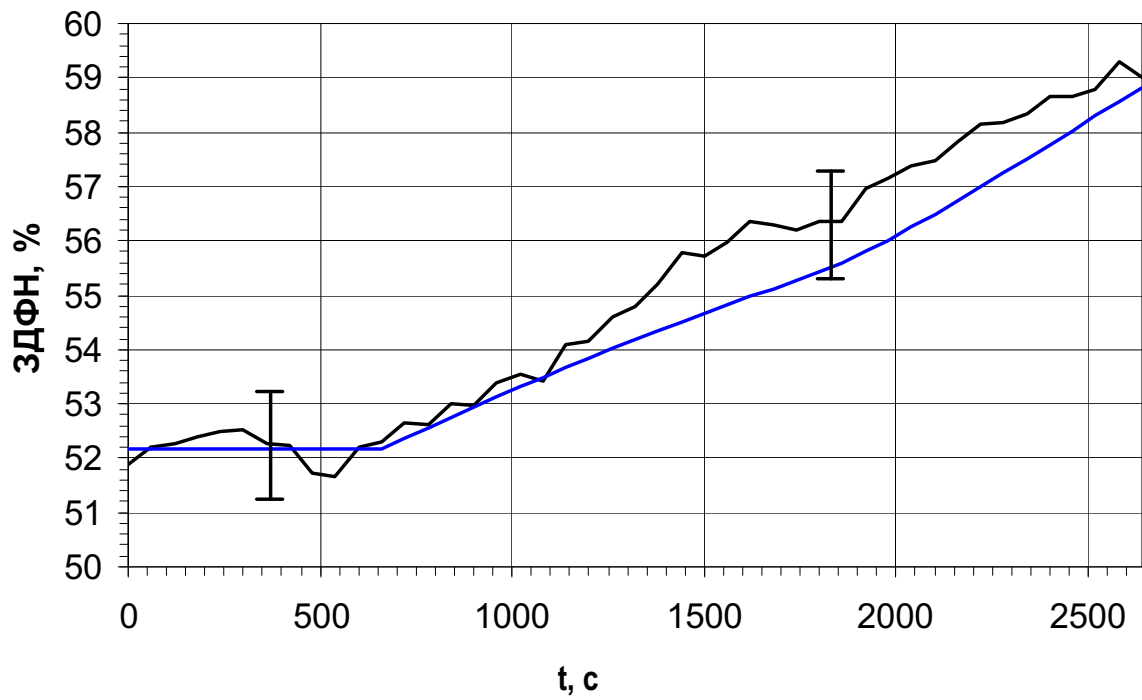


Рис. 4.7. Временная диаграмма ЗДФН:
 — установка «Утес»; — модель

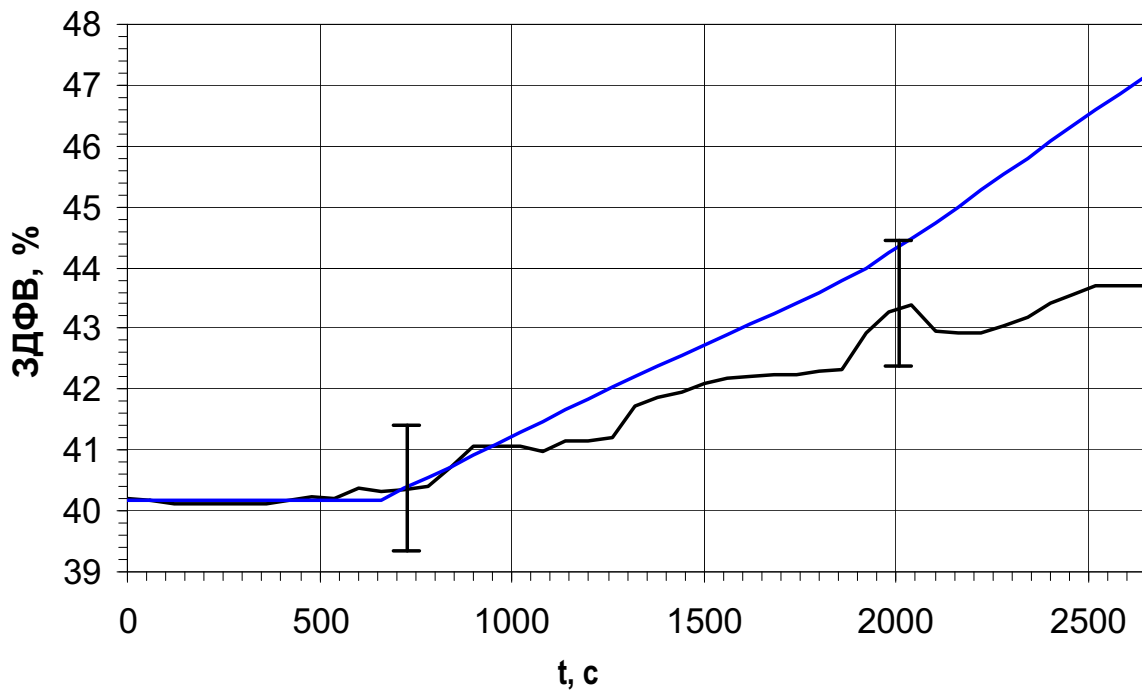


Рис. 4.8. Временная диаграмма ЗДФВ:
 — установка «Утес»; — модель

Суммарная погрешность модели по рассмотренным экспериментам составляет [39, 40, 41]:

$$S_c = \sqrt{(S_1)^2 + (S_2)^2} = \sqrt{(0,85)^2 + (1,64)^2} \approx 1,85(\%). \quad (4.3)$$

Погрешность измерения плотности экстракта, ЗДФН и ЗДФВ находится на уровне $S_0 = 1 \%$. Модель **адекватна** реальной установке, так как выполняется условие [38]:

$$\left(\frac{S_c}{S_0}\right)^2 < F_T, \quad \left(\frac{S_c}{S_0}\right)^2 = 3,42, \quad F_T = 6,59, \quad (4.4)$$

где $F_T = 6,59$ – значение критерия Фишера для степеней свободы:

$$v_{ад} = N - 1 = 3, \quad v_0 = N \cdot (m - 1) = 4; \quad (4.5)$$

$N = 4$ – число проведенных опытов; $m = 2$ – число параллельных опытов.

Таким образом, имитационная модель экстракционной колонны, разработанная согласно критерию Фишера, адекватна реальному процессу (с погрешностью не более 5 %) в диапазоне $\pm 20 \%$ от регламентных значений переменных.

5. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В настоящее время актуальность применения типовых законов регулирования при построении САУ практически любым технологическим процессом объясняется очень большим (тысячи, десятки тысяч) количеством локальных систем автоматики, применяемых во всех отраслях промышленности, и, соответственно, большим количеством персонала, эксплуатирующего эти системы. Кроме того, методики настройки этих законов регулирования хорошо зарекомендовали себя за сравнительно большой период времени (десятки лет), а также достаточно подробно представлены в литературе. Поэтому при построении САУ экстракционной колонной отдельные контуры синтезированы на базе типовых законов регулирования.

В нашем случае, для синтеза САУ процессом экстракции в колонне, можно использовать математический аппарат теории автоматического управления (ТАУ) [42, 43, 44]. Для этого разработанную имитационную модель (разд. 3.2) необходимо аппроксимировать упрощенной математической моделью, построенной на основе типовых звеньев САУ. Здесь можно использовать метод идентификации, основанный на аппроксимации переходных процессов при ступенчатых воздействиях решением дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Следует отметить, что математическая модель колонны, представленная в разд. 3.2, является нелинейной. В связи с тем, что синтез САУ с использованием типовых законов регулирования основан на использовании линейной модели технологического объекта управления, встает необходимость линеаризации имитационной модели.

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить следующие исследования:

1. Исследование статических характеристик зависимостей имитационной модели с целью проверки возможности ее линеаризации.
2. Исследование влияния режима работы пульсационной камеры экстракционной колонны на амплитуду пульсаций жидкости в колонне.
3. Исследование влияния распределения урана по высоте колонны на параметры модели и контролируемые переменные.
4. Исследование влияния параметров потоков водных и органических фаз (расходы и концентрации урана) на основные контролируемые переменные колонны.
5. Исследование влияния амплитуды пульсаций жидкости в колонне на основные контролируемые переменные.

5.1. Исследование статических характеристик зависимостей имитационной модели колонны

На примере имитационной модели головной колонны (разд. 3.2) исследованы статические характеристики зависимостей:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{эк}} &= f(Q_{\text{вф4}}), \quad \rho_{\text{эк}} = f(Q_{\text{оф}}), \\ L_{\text{зн}} &= f(Q_{\text{вф4}}), \quad L_{\text{зн}} = f(Q_{\text{оф}}), \\ L_{\text{зв}} &= f(Q_{\text{вф4}}), \quad L_{\text{зв}} = f(Q_{\text{оф}}), \\ C_{\text{и}_{\text{раф}}} &= f(Q_{\text{вф4}}), \quad C_{\text{и}_{\text{раф}}} = f(Q_{\text{оф}}), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где $\rho_{\text{эк}}$ – плотность экстракта; $L_{\text{зн}}$, $L_{\text{зв}}$ – ЗДФН и ЗДФВ; $C_{\text{и}_{\text{раф}}}$ – концентрация урана в рафинате; $Q_{\text{вф4}}$, $Q_{\text{оф}}$ – расход ВФ4 и ОФ.

В качестве входных воздействий приняты расходы ВФ4 и ОФ, так как они оказывают наиболее существенное влияние на процессы в головной колонне установки «Утес» и в настоящее время используются как управляемые переменные (ВФ4 – нагрузка, ОФ – производительность). Следовательно, необходимо установить эти зависимости и выделить на них линейные участки.

На рис. 5.1–5.4 представлены полученные на компьютерной модели головной колонны статические зависимости плотности экстракта ($\rho_{\text{эк}}$), относительной концентрации урана в рафинате ($C_{\text{и}_{\text{раф}}}/C_{\text{и}_{\text{рн}}}$), величин ЗДФН ($L_{\text{зн}}$) и ЗДФВ ($L_{\text{зв}}$) от относительного расхода ВФ4 ($Q_{\text{вф4}}/Q_{\text{н}}$), где $C_{\text{и}_{\text{рн}}}$ – начальная концентрация урана в рафинате; $Q_{\text{н}}$ – начальный расход ВФ4.

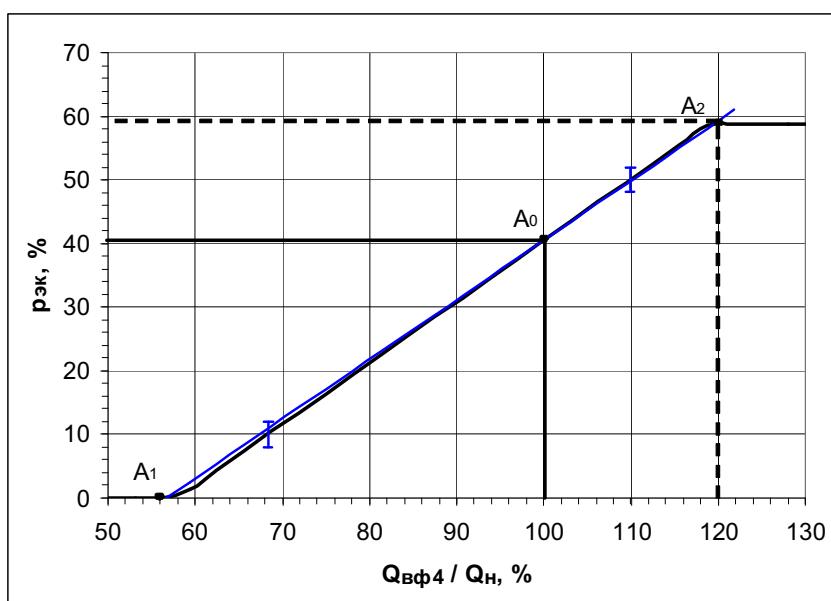


Рис. 5.1. Зависимость плотности экстракта от относительного расхода ВФ4

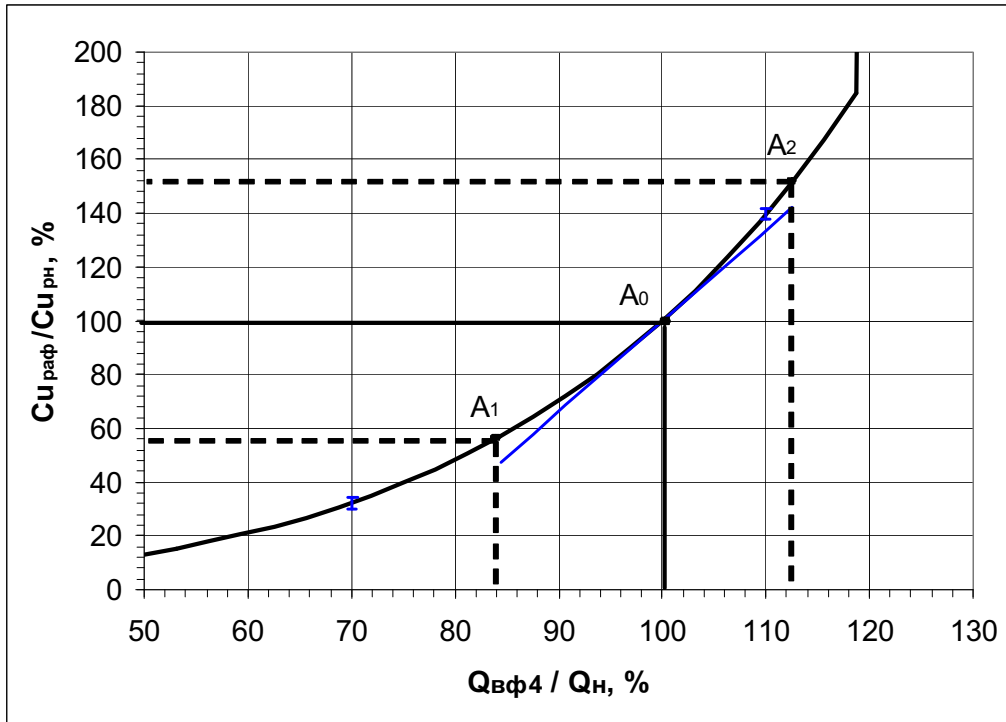


Рис. 5.2. Зависимость относительной концентрации урана в раффinate от относительного расхода ВФ4: $Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в раффinate

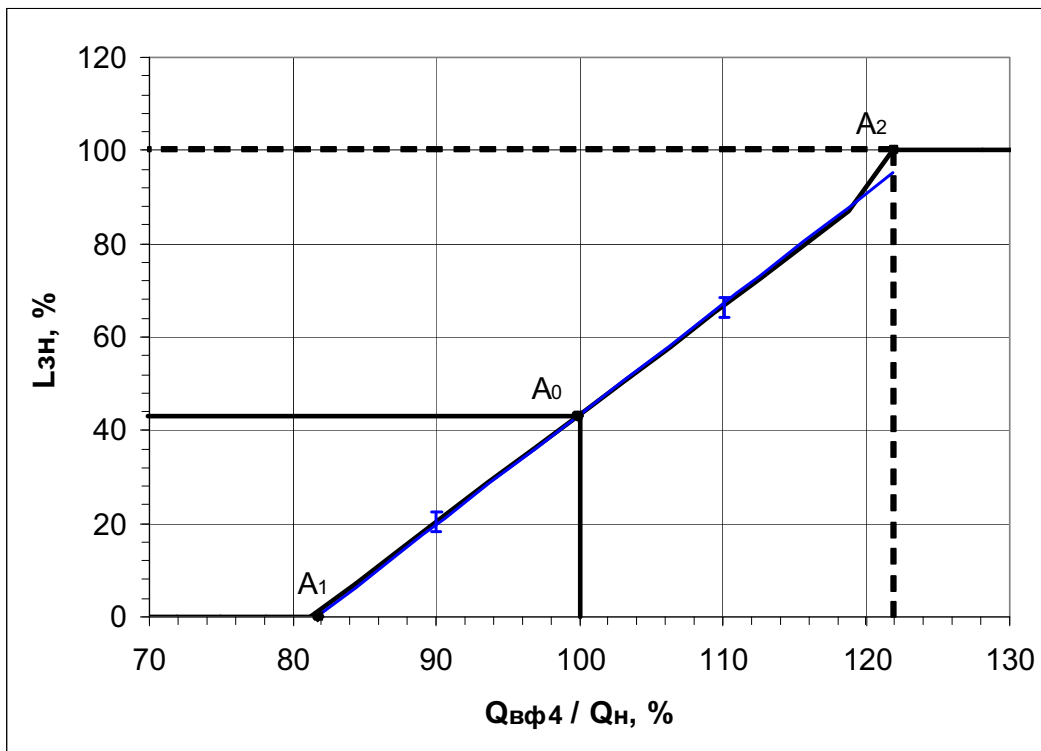


Рис. 5.3. Зависимость ЗДФН от относительного расхода ВФ4

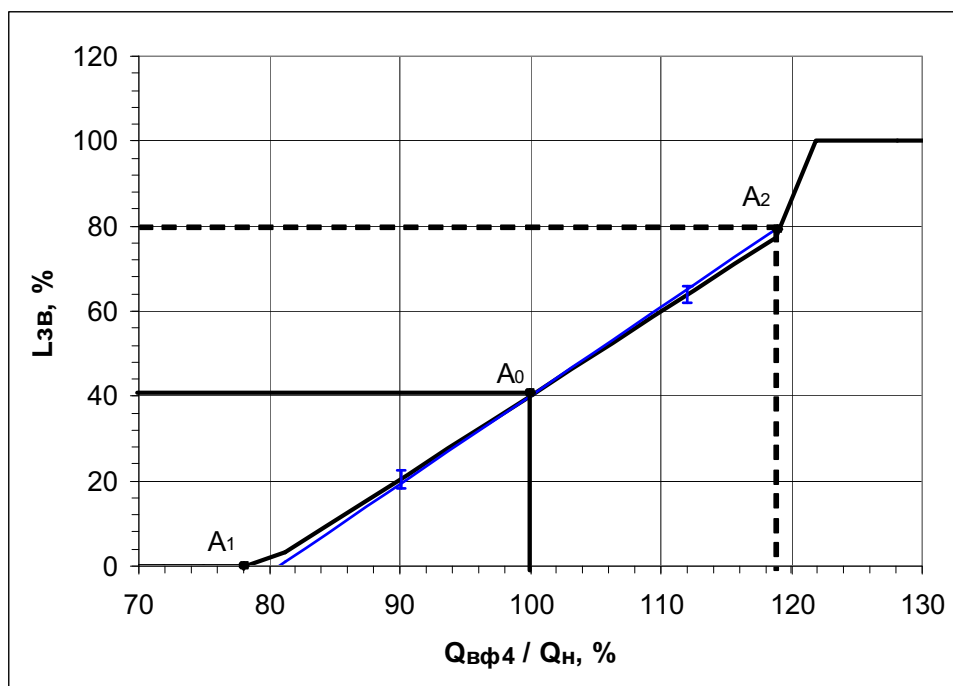


Рис. 5.4. Зависимость ЗДФВ от относительного расхода ВФ4

Интервалы линейных участков статических зависимостей (рис. 5.1–5.4) при их линейзации представлены в табл. 5.1, где обозначено: S_n – среднеквадратичное отклонение линейной зависимости от нелинейной; δ_n – нелинейность зависимости на интервале (A2–A1); A0 – рабочая точка; (A2–A1) – интервал линейного участка при заданной нелинейности $\delta_n < 10\%$; $\Delta_{лн}$ – симметричный относительно рабочей точки A0 интервал линейного участка.

Таблица 5.1

Характеристики рабочих интервалов статических зависимостей при их линейзации (по расходу ВФ4)

Точки	Плотность экстракта		Концентрация урана в рафинате		ЗДФН		ЗДФВ	
	$Q_{вф4}/Q_n$, %	$\rho_{эк}$, %	$Q_{вф4}/Q_n$, %	$Cu_{раф}/Cu_{рн}$, %	$Q_{вф4}/Q_n$, %	$L_{зн}$, %	$Q_{вф4}/Q_n$, %	$L_{зв}$, %
A0	100	40,5	100	100	100	43,4	100	40,1
A1	56	0	84	57	82	0	78	0
A2	120	58,7	113	151	122	100	119	80
A2–A1	64	58,7	29	94	40	100	41	80
$\Delta_{лн}$, %	± 20	± 18	± 13	± 43	± 18	± 43	± 19	± 40
S_n , %	2		5,5		3,4		4,9	
δ_n , %	2,3		9,5		4,8		5,5	

На рис. 5.5–5.8 представлены полученные на компьютерной модели головной колонны статические зависимости плотности экстракта, относительной концентрации урана в рафинате, величин ЗДФН и ЗДФВ от относительного расхода ОФ ($Q_{оф}/Q_n$), где Q_n – начальный расход ОФ, а в табл. 5.2 – интервалы линейных участков этих зависимостей.

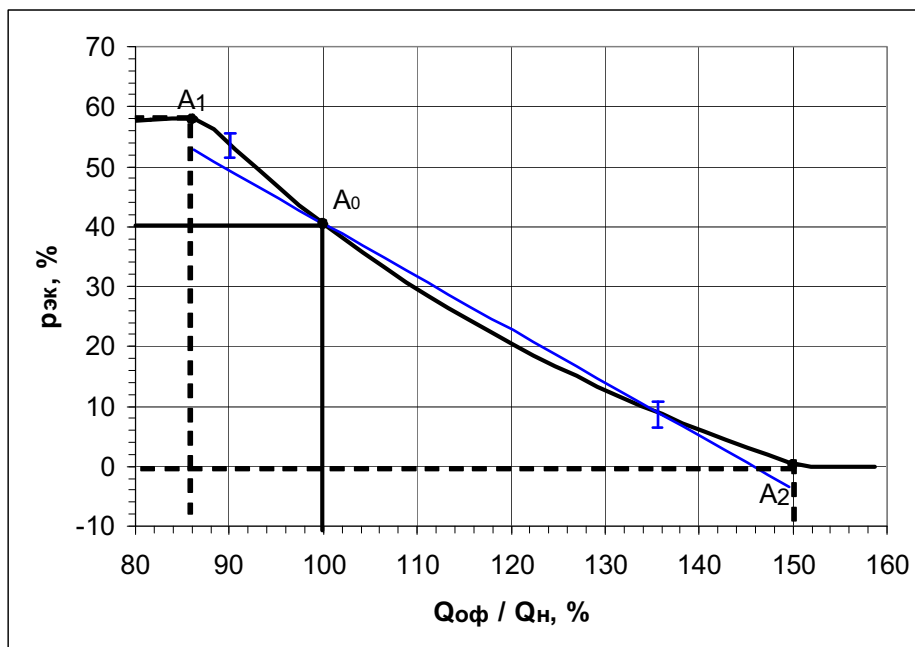


Рис. 5.5. Зависимость плотности экстракта от относительного расхода ОФ:
 Q_n – начальный расход ОФ

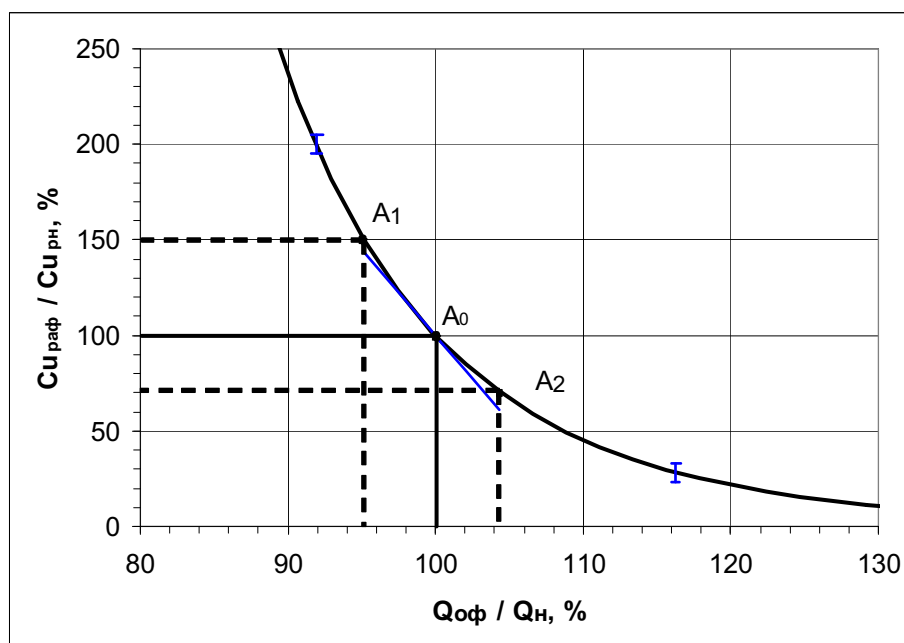


Рис. 5.6. Зависимость относительной концентрации урана в рафинате от относительного расхода ОФ:
 $Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в рафинате

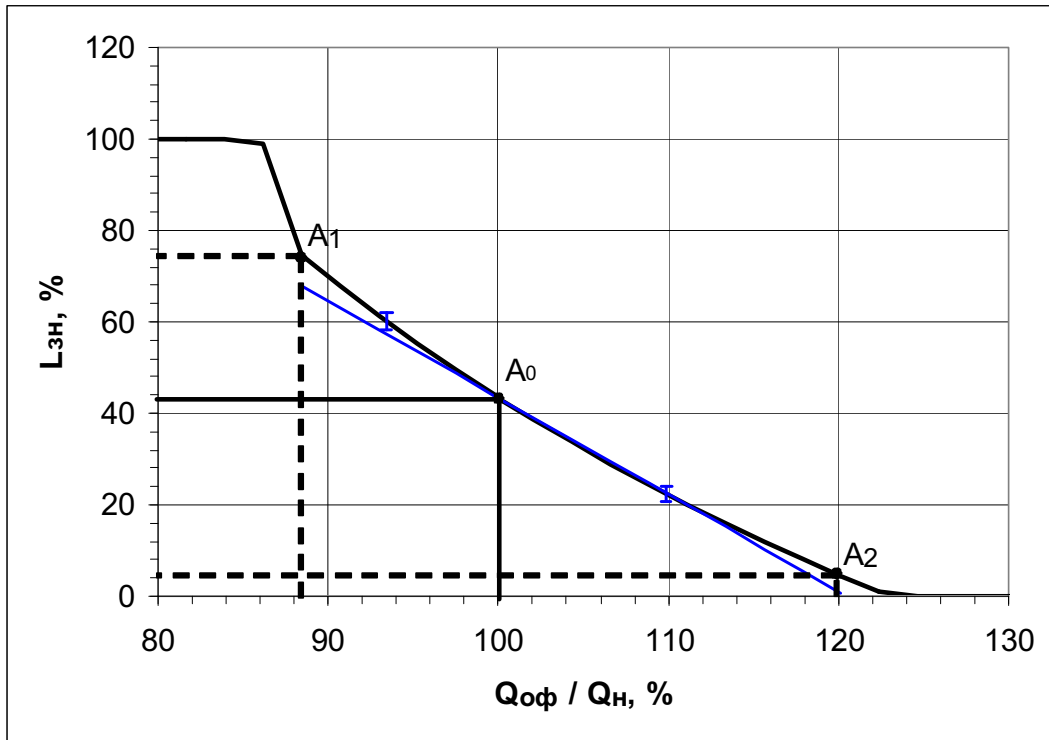


Рис. 5.7. Зависимость ЗДФН от относительного расхода ОФ

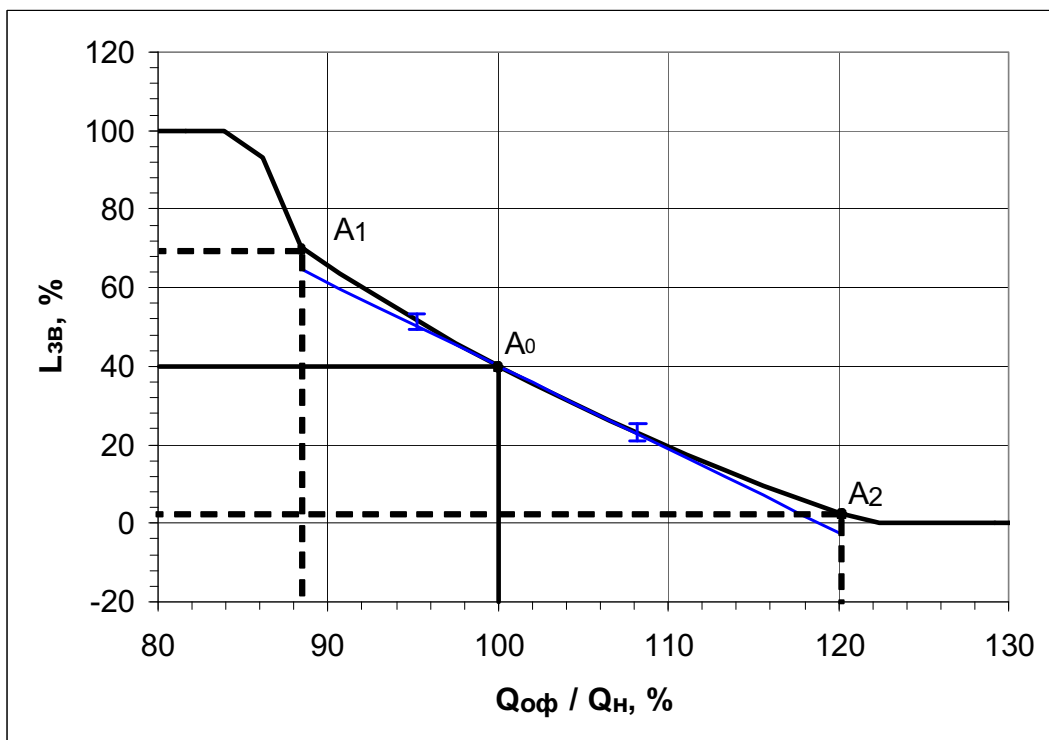


Рис. 5.8. Зависимость ЗДФВ от относительного расхода ОФ

Таблица 5.2

Характеристики рабочих интервалов статических зависимостей при их линейризации (по расходу ОФ)

Точки	Плотность экстракта		Концентрация урана в рафинате		ЗДФН		ЗДФВ	
	$Q_{оф}/Q_{н}$, %	$\rho_{эк}$, %	$Q_{оф}/Q_{н}$, %	$С_{и\text{раф}}/С_{и\text{рн}}$, %	$Q_{оф}/Q_{н}$, %	$L_{зн}$, %	$Q_{оф}/Q_{н}$, %	$L_{зв}$, %
A0	100	40,5	100	100	100	43,4	100	40,1
A1	86	58	95	150	88,4	74,6	88,4	70,4
A2	150	0	104	70	120,2	4,5	120,2	2,3
A2-A1	64	58	9	80	31,8	70,1	31,8	68,1
$\Delta_{лн}$, %	± 14	± 18	± 4	± 30	± 12	± 31	± 12	± 30
S_n , %	6,1		5,2		6,1		6,6	
δ_n , %	5,5		9,3		6,7		5,7	

Выполним выбор допустимых диапазонов изменения расходов ВФ4 и ОФ в линейной модели без учета нелинейности зависимости концентрации урана в рафинате от расходов ВФ4 и ОФ. Так как концентрация урана в рафинате не влияет на другие контролируемые переменные ЭК1 и не используется непосредственно как регулируемая величина.

Анализ результатов, представленных в табл. 5.1 и 5.2, показывает, что при нелинейности 10 % на статических зависимостях (5.1) можно выделить линейные участки ± 20 % по расходу ВФ4 и ± 12 % – по расходу ОФ.

Таким образом, имитационную модель головной колонны (нелинейную математическую модель) можно заменить на линейную в окрестностях рабочей точки ± 20 % по расходу ВФ4 и ± 12 % – по расходу ОФ с погрешностью не более 10 %.

5.2. Исследование влияния работы пульсационной камеры на амплитуду пульсаций жидкости в колонне

Двойная амплитуда (a) и частота пульсаций определяют интенсивность пульсаций жидкости в ЭК [9]:

$$I = f \cdot a \text{ (см/мин)}. \quad (5.2)$$

В разработанной имитационной модели колонны интенсивность пульсаций столба жидкости входит в расчет среднего диаметра капель дисперсной фазы, который, в свою очередь, входит в расчет средней скорости погружения дисперсной фазы и оказывает существенное влияние на работу колонны.

С другой стороны, интенсивность пульсаций ($I_{сж}$) столба жидкости в колонне задает пульс-камера колонны (ПК). Эту величину можно описать в виде бесконечного ряда гармоник:

$$I_{сж} = a_0 \cdot f_0 + a_1 \cdot f_1 + a_2 \cdot f_2 + a_3 \cdot f_3 + a_4 \cdot f_4 + \dots, \quad (5.3)$$

а колебания столба жидкости в колонне – в виде ряда Фурье (например, по синусам):

$$\Delta L_{сж}(t) = \frac{a_0}{2} \sin(2\pi f_0 t) + \frac{a_1}{2} \sin(2\pi f_1 t) + \frac{a_2}{2} \sin(2\pi f_2 t) + \dots, \quad (5.4)$$

где $f_0 = 100 \text{ мин}^{-1}$ – частота импульсов сжатого воздуха в пульсопроводе ПК; f_1, f_2, \dots – частота низкочастотных колебаний столба жидкости; a_1, a_2, \dots – их амплитуды, вызванные нестабильностью работы ПК, причем

$$I_{сж} = K_{пк} \cdot I_{сж}^{пк}, \quad (5.5)$$

$$a_i = K_{пк} \cdot a_i^{пк}, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, \quad (5.5)$$

$$K_{пк} = \frac{S_{пк}}{S_{эк}} \approx \frac{0,11}{0,6} \approx 0,18, \quad (5.6)$$

где $I_{сж}^{пк}$ – интенсивность пульсаций жидкости в ПК1, см/мин; $a_i^{пк}$ – двойная амплитуда пульсаций жидкости в ПК1; $S_{пк}$ – сечение рабочего объема ПК1, м^2 ; $S_{эк}$ – сечение экстракционной части ЭК1 (табл. 3.1).

На рис. 5.9 представлена временная диаграмма изменения уровня жидкости в ПК (Лпк) на основе данных, полученных на установке.

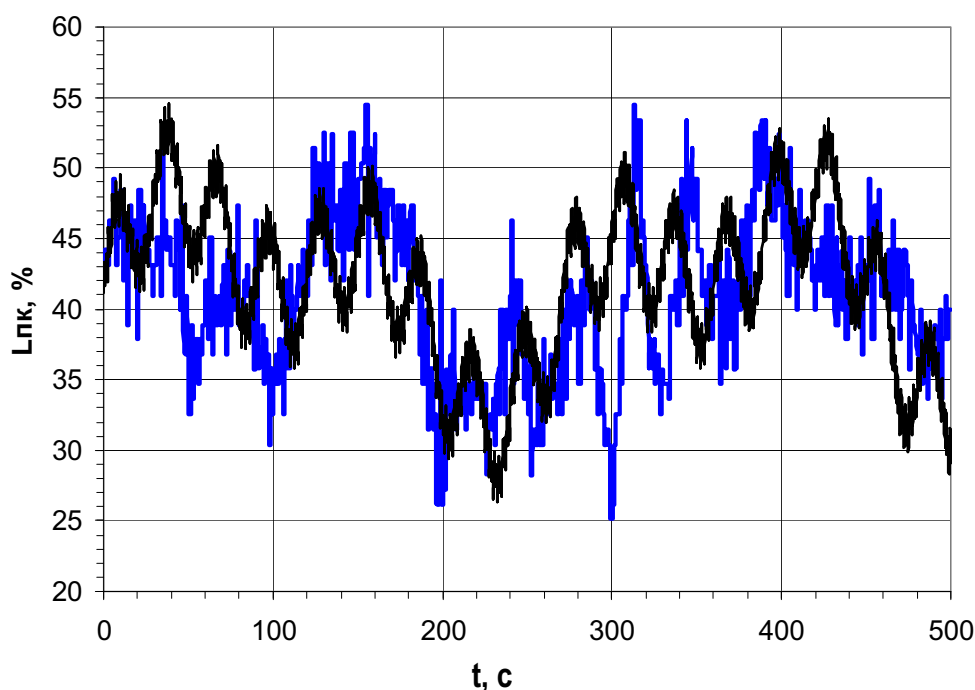


Рис. 5.9. Уровень жидкости в ПК при нормальном режиме работы САР:
— экспериментальные данные; — аппроксимация

Аппроксимация изменения уровня жидкости в ПК выполнена с помощью ряда Фурье по синусам с использованием 6 гармоник (причем, 100 % соответствует 600 мм шкалы НИОУ):

$$\Delta L_{\text{сж}}^{\text{ПК}}(t) = \frac{a_0^{\text{ПК}}}{2} \sin(2\pi f_0 t) + \frac{a_1^{\text{ПК}}}{2} \sin(2\pi f_1 t) + \dots + \frac{a_6^{\text{ПК}}}{2} \sin(2\pi f_6 t), \quad (5.8)$$

параметры которого представлены в табл. 5.3, погрешность аппроксимации составила 14 %.

Зависимость интенсивности пульсаций столба жидкости в ЭК1 от изменения уровня жидкости в ПК по (5.8) с параметрами из табл. 5.3 определяется выражением:

$$I_{\text{сж}} = K_{\text{ПК}} \cdot (a_0^{\text{ПК}} f_0 + a_1^{\text{ПК}} f_1 + a_2^{\text{ПК}} f_2 + a_3^{\text{ПК}} f_3 + a_4^{\text{ПК}} f_4 + a_5^{\text{ПК}} f_5 + a_6^{\text{ПК}} f_6) \approx 200(\text{см/мин}). \quad (5.9)$$

Данную величину можно заменить на эквивалентную интенсивность пульсаций:

$$I_{\text{сж}}^{\text{ЭКВ}} = a_{\text{ЭКВ}} \cdot f_0 = I_{\text{сж}}, \quad (5.10)$$

откуда находим эквивалентную амплитуду пульсаций столба жидкости в колонне на основной частоте, которую можно использовать в расчетах имитационной модели:

$$a_{\text{ЭКВ}} = \frac{I_{\text{сж}}^{\text{ЭКВ}}}{f_0} = \frac{200}{100} = 2(\text{см}). \quad (5.11)$$

Таблица 5.3

Параметры ряда Фурье при нормальной работе ПК1

Гармоники	Двойная амплитуда пульсаций в ПК1, $a_i^{\text{ПК}}$, см	Частота f_i , мин ⁻¹
0	10	100
1	1,5	50
2	0,75	25
3	0,35	12,5
4	5	2
5	5	0,46
6	6	0,2

Таким образом, получаем, что режим работы ПК существенно влияет на эквивалентную амплитуду пульсаций. Рассмотрим это на примере ненормальной работы системы автоматического регулирования (САР) уровня в ПК, когда отклонение уровня жидкости в ПК превышают допустимые значения. Например, по причине большого выбега вала ИМ ПК. В данном случае временная диаграмма уровня ПК может иметь вид, как показано на рис. 5.10, для случая с параметрами ряда (5.8) в табл. 5.4.

Эквивалентная амплитуда пульсаций столба жидкости в колонне в данном случае составляет:

$$a_{\text{ЭКВ}} = \frac{I_{\text{СЖ}}^{\text{ЭКВ}}}{f_0} = \frac{250}{100} = 2.5(\text{см}), \quad (5.12)$$

что соответствует увеличению a , по сравнению с нормальным режимом работы ПК, на 25 %.

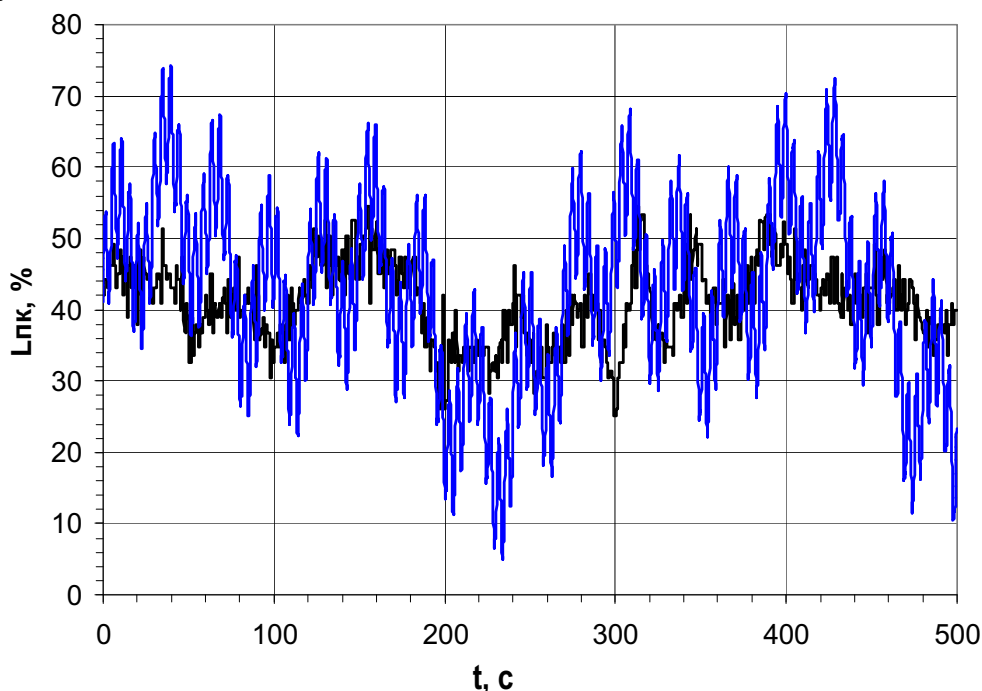


Рис. 5.10. Уровень в ПК1 при ненормальном режиме работы САР:
 — нормальный режим; — ненормальный режим

Таблица 5.4

Параметры ряда Фурье при ненормальном режиме работе ПК

Гармоники	Двойная амплитуда пульсаций в ПК1, $a_i^{\text{ПК}}$, см	Частота f_i , мин ⁻¹
0	10	100
1	1,5	50
2	0,75	25
3	10	12,5
4	12	2
5	11	0,46
6	11	0,2

Следует отметить, что при использовании модуля управления исполнительным механизмом постоянной скорости ПСТ-М в САР уровня жидкости в ПК такие возмущения по амплитуде пульсаций жидкости в колонне на установке «Утес» происходят достаточно часто.

5.3. Исследование влияния параметров потоков ВФ1–ВФ4, ОФ и амплитуды пульсаций жидкости в колонне на основные переменные

Рассмотрим исследование параметров водных и органических потоков, а также амплитуды пульсаций жидкости в колонне на примере головной колонны установки «Утес» РХЗ СХК.

Способ исследований – классический для современной теории управления [45, 46, 47] – исследование реакций контролируемых переменных на ступенчатые изменения входных воздействий. При этом в пределах одного эксперимента одновременно формируется одно ступенчатое воздействие по одному управляющему воздействию, остальные переменные остаются постоянными.

5.3.1. Влияние расходов ВФ1, ВФ2, ВФ3, ВФ4 на переменные колонны

В данных экспериментах производилось ступенчатое изменение расходов ВФ1, ВФ2, ВФ3, ВФ4 на –6 % ($\Delta Q_{ВФi}$), как представлено на рис. 5.11. На рис. 5.12 представлена временная диаграмма плотности экстракта ($\rho_{эк}$), на рис. 5.13 – ЗДФН, рис. 5.14 – ЗДФВ, рис. 5.15 – относительная концентрация урана в экстракте ($Cu_{эк}/Cu_{н}$), рис. 5.16 – относительная концентрация урана в рафинате ($Cu_{раф}/Cu_{рн}$), где $Cu_{н}$ – начальная концентрация урана в экстракте; $Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в рафинате.

Анализ представленных рисунков показывает, что наибольшее влияние на переменные колонны оказывает расход ВФ4, а наименьшее – расход ВФ2. Кроме этого, следует отметить, что в таких переменных, как плотность экстракта (концентрация урана в экстракте) и концентрация урана в рафинате, обнаружено существенное запаздывание.

Рассмотренные переходные процессы восстановлены при помощи апериодического звена первого порядка с запаздыванием [42, 48]:

$$W_o^{qi}(s) = \frac{k_o^{qi}}{T_o^{qi}s + 1} \cdot e^{-\tau_o^{qi}s}, \quad (5.13)$$

где k_o^{qi} – коэффициенты передачи по расходам ВФ i ; T_o^{qi} – постоянные времени, с; τ_o^{qi} – чистые (транспортные) запаздывания, с.

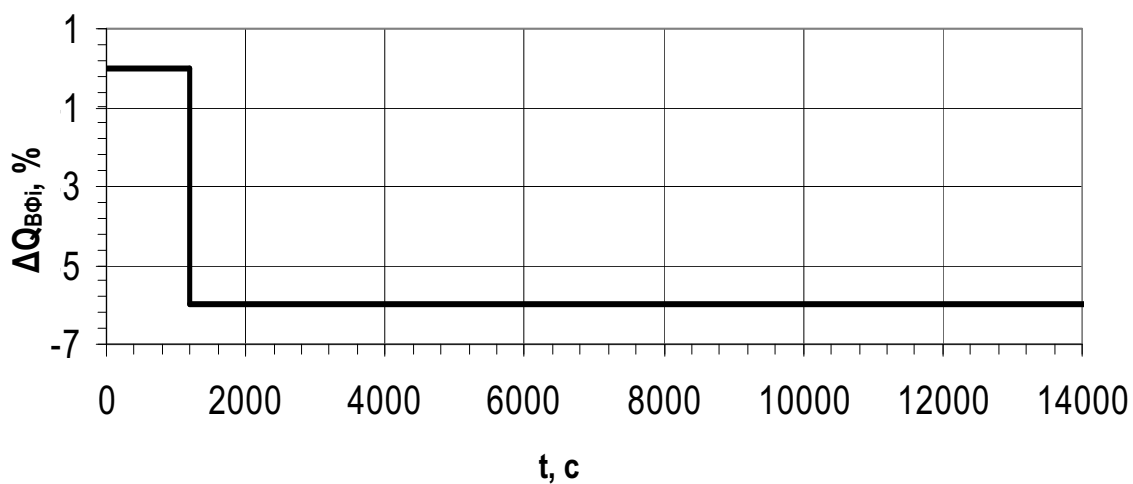


Рис. 5.11. Ступенчатое изменение расходов ВФ1...ВФ4

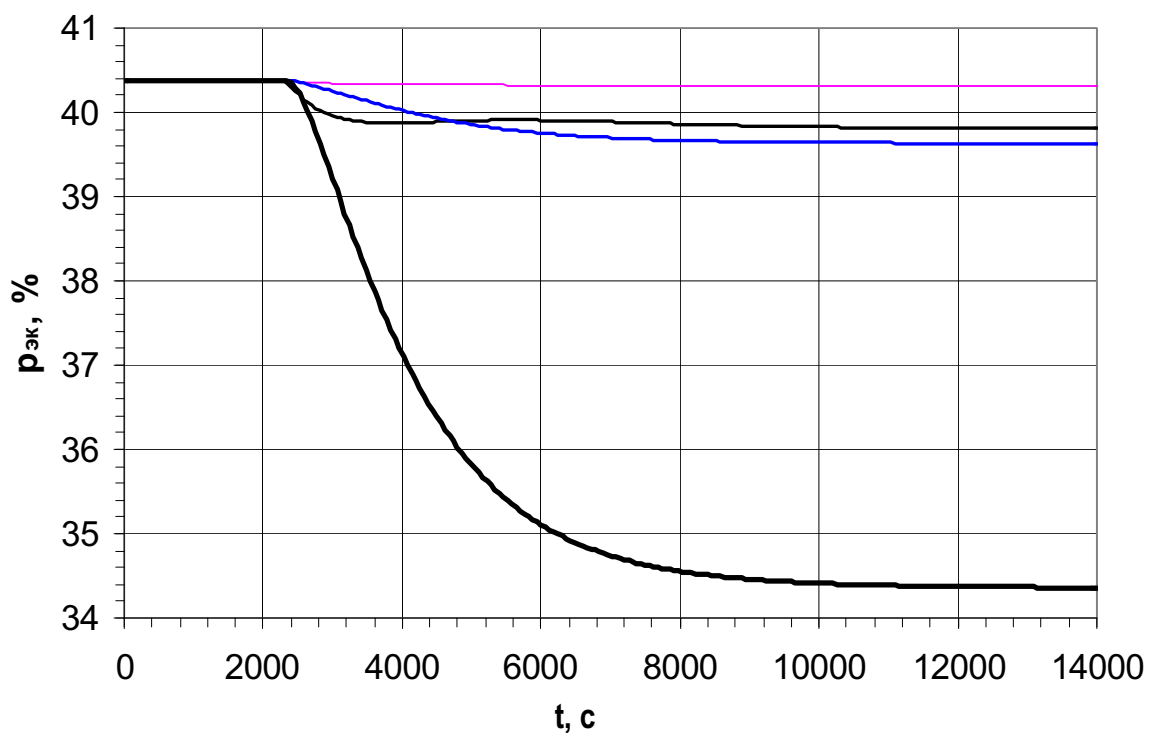


Рис. 5.12. Временная диаграмма плотности экстракта:
 — $Q_{ВФ1}$ — реакция на ступенчатое изменение расхода ВФ1;
 — $Q_{ВФ2}$ — реакция на ступенчатое изменение расхода ВФ2;
 — $Q_{ВФ3}$ — реакция на ступенчатое изменение расхода ВФ3;
 — $Q_{ВФ4}$ — реакция на ступенчатое изменение расхода ВФ4

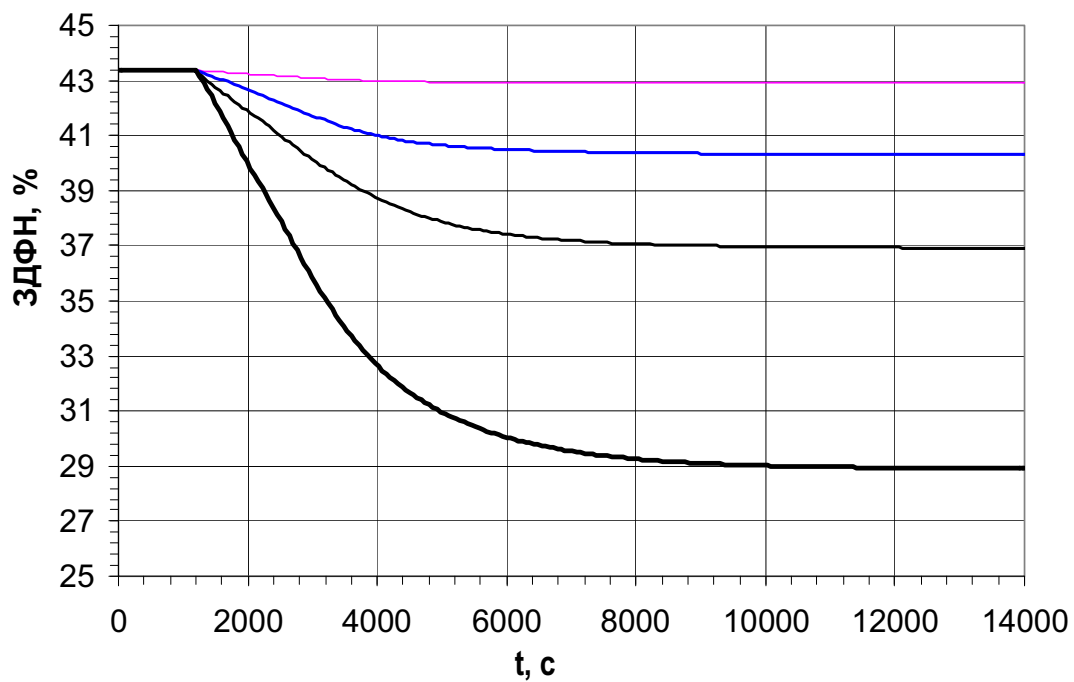


Рис. 5.13. Временная диаграмма ЗДФН:
 — $Q_{BФ1}$; — $Q_{BФ2}$; — $Q_{BФ3}$; — $Q_{BФ4}$

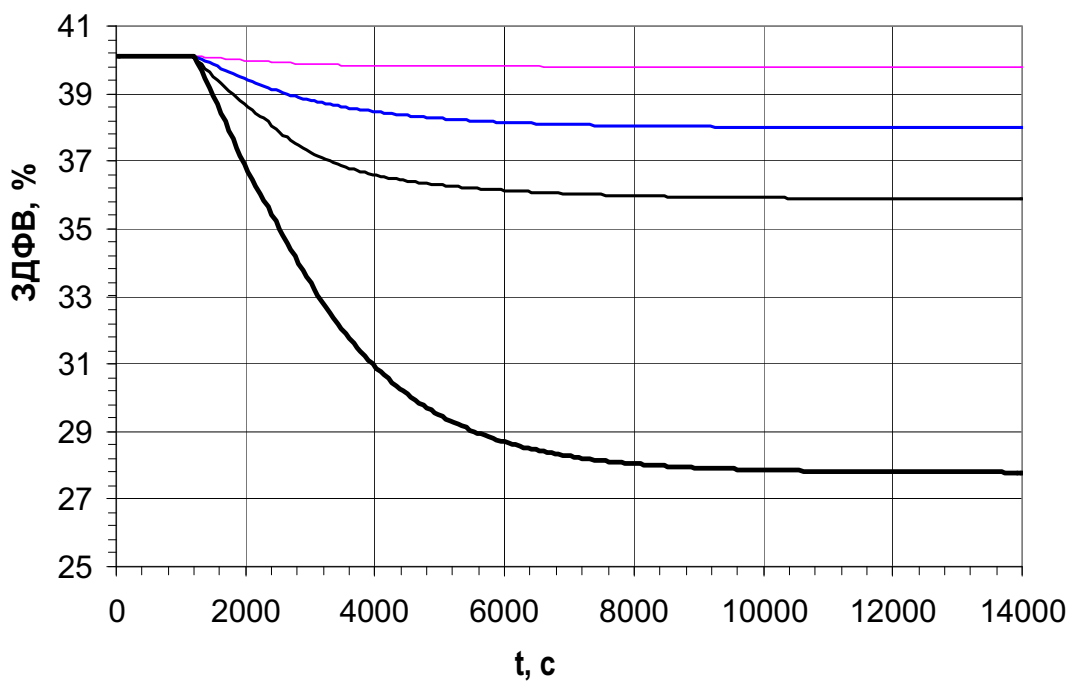


Рис. 5.14. Временная диаграмма ЗДФВ:
 — $Q_{BФ1}$; — $Q_{BФ2}$; — $Q_{BФ3}$; — $Q_{BФ4}$

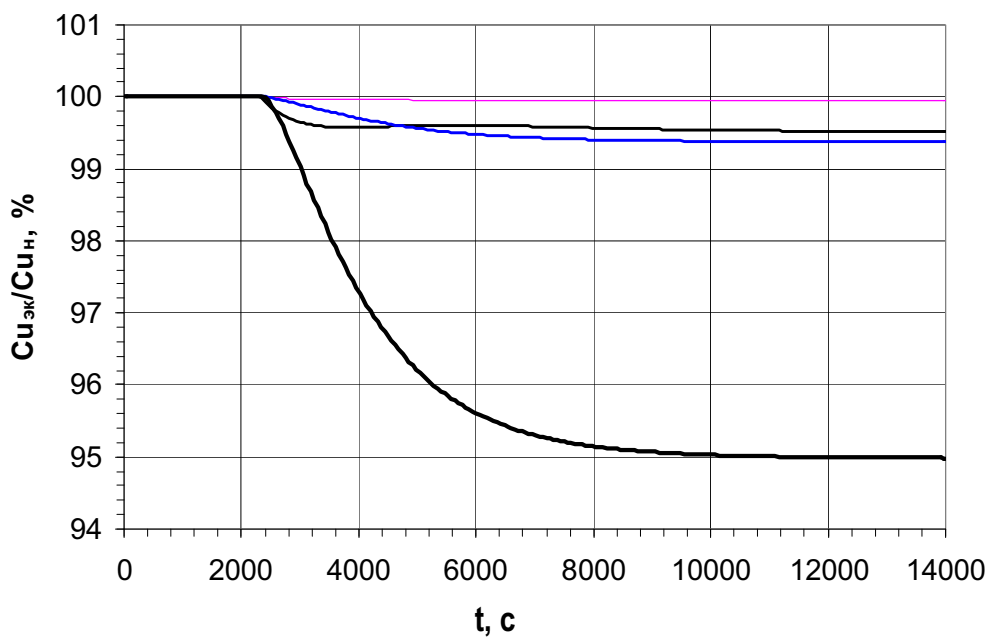


Рис. 5.15. Относительная концентрация урана в экстракте:

$Cu_{н}$ – начальная концентрация урана в экстракте;

— $Q_{ВФ1}$; — $Q_{ВФ2}$; — $Q_{ВФ3}$; — $Q_{ВФ4}$

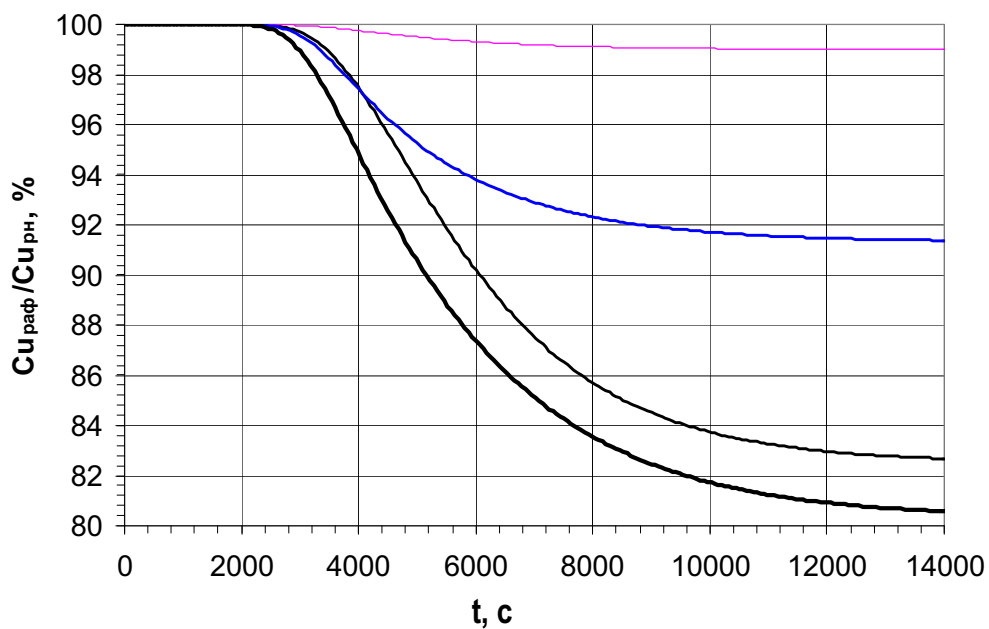


Рис. 5.16. Относительная концентрация урана в раффinate:

$Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в раффinate;

— $Q_{ВФ1}$; — $Q_{ВФ2}$; — $Q_{ВФ3}$; — $Q_{ВФ4}$

5.3.2. Влияние концентраций урана в ВФ1, ВФ2, ВФ3, ВФ4 на контролируемые переменные колонны

В данных экспериментах производилось ступенчатое изменение концентраций урана в ВФ1, ВФ2, ВФ3, ВФ4 на -10% ($\Delta Cu_{ВФi}$), как представлено на рис. 5.17. На рис. 5.18 представлена временная диаграмма плотности экстракта ($\rho_{эк}$), на рис. 5.19 – ЗДФН, рис. 5.20 – ЗДФВ, рис. 5.21 – относительная концентрация урана в экстракте ($Cu_{эк}/Cu_{н}$), рис. 5.22 – относительная концентрация урана в рафинате ($Cu_{раф}/Cu_{рн}$).

Анализ представленных рисунков показывает (аналогично, как в предыдущем случае), что наибольшее влияние на переменные колонны оказывает концентрация урана в ВФ4, а наименьшее – в ВФ2. Также в таких параметрах, как плотность экстракта (концентрация урана в экстракте) и концентрация урана в рафинате, обнаружено существенное запаздывание.

Рассмотренные переходные процессы (как и в предыдущем случае) восстановлены при помощи апериодического звена первого порядка с запаздыванием:

$$W_o^{cui}(s) = \frac{k_o^{cui}}{T_o^{cui}s + 1} \cdot e^{-\tau_o^{cui}s}, \quad (5.14)$$

где k_o^{cui} – коэффициенты передачи по концентрации урана в водных фазах ВФ i ; T_o^{cui} – постоянные времени, с; τ_o^{cui} – чистые (транспортные) запаздывания, с.

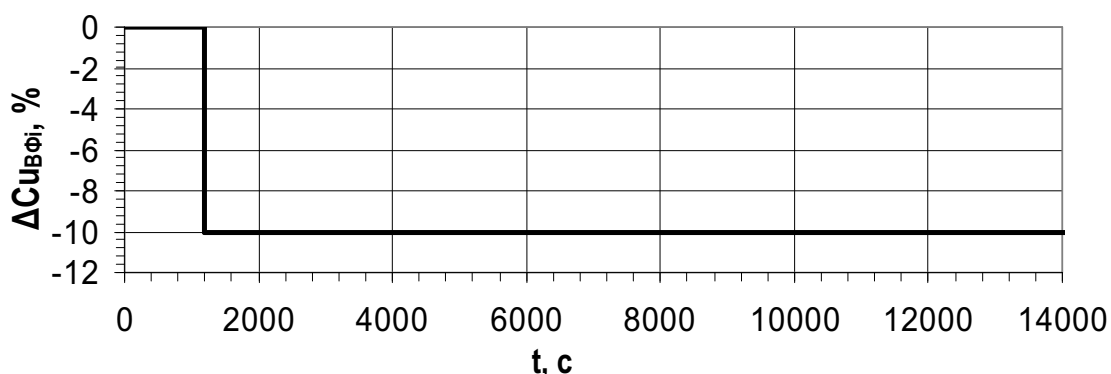


Рис. 5.17. Ступенчатое воздействие по концентрациям урана в ВФ1...ВФ4

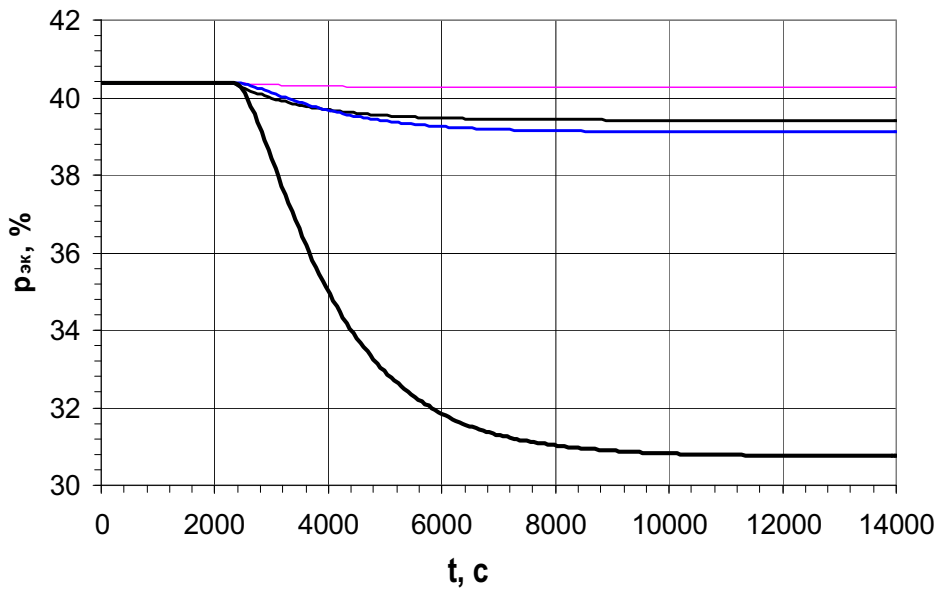


Рис. 5.18. Временная диаграмма плотности экстракта:

- $C_{иВФ1}$ — реакция на ступенчатое изменение концентрации урана в ВФ1;
- $C_{иВФ2}$ — реакция на ступенчатое изменение концентрации урана в ВФ2;
- $C_{иВФ3}$ — реакция на ступенчатое изменение концентрации урана в ВФ3;
- $C_{иВФ4}$ — реакция на ступенчатое изменение концентрации урана в ВФ4

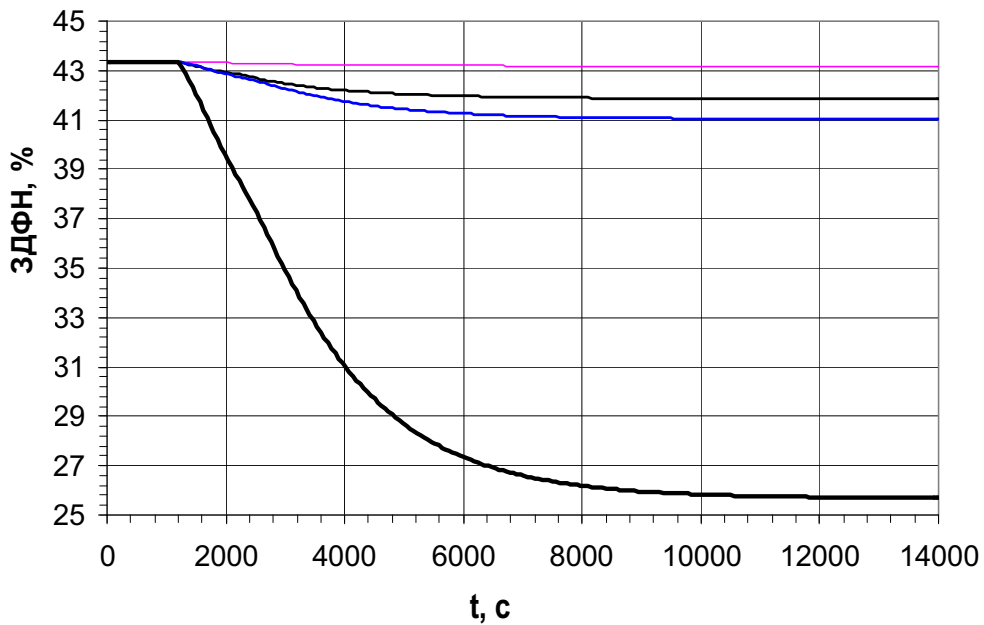


Рис. 5.19. Временная диаграмма ЗДФН:

- $C_{иВФ1}$; — $C_{иВФ2}$; — $C_{иВФ3}$; — $C_{иВФ4}$

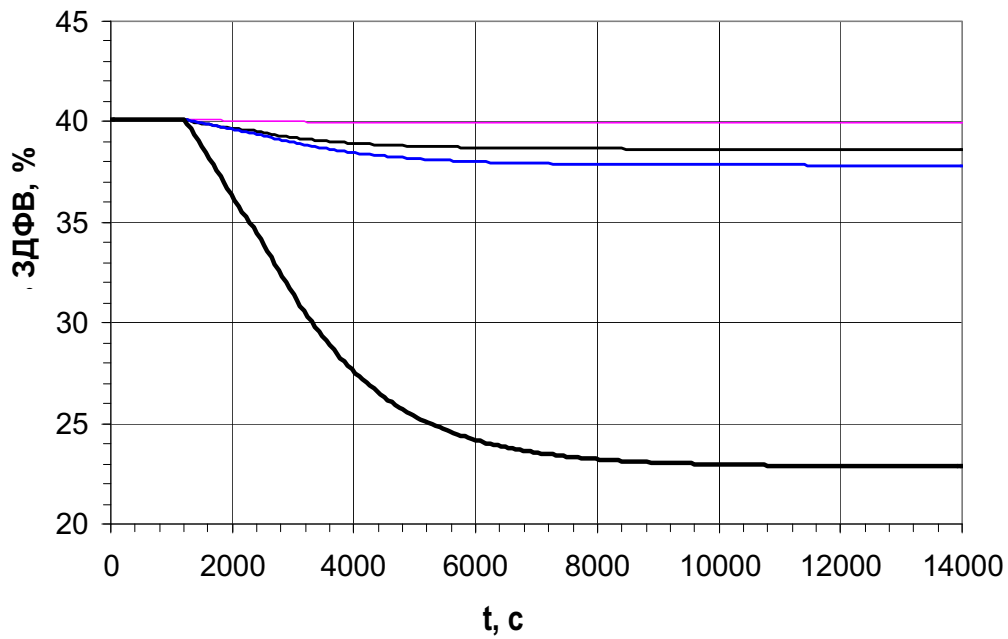


Рис. 5.20. Временная диаграмма ЗДФВ:

— $C_{ВФ1}$; — $C_{ВФ2}$; — $C_{ВФ3}$; — $C_{ВФ4}$

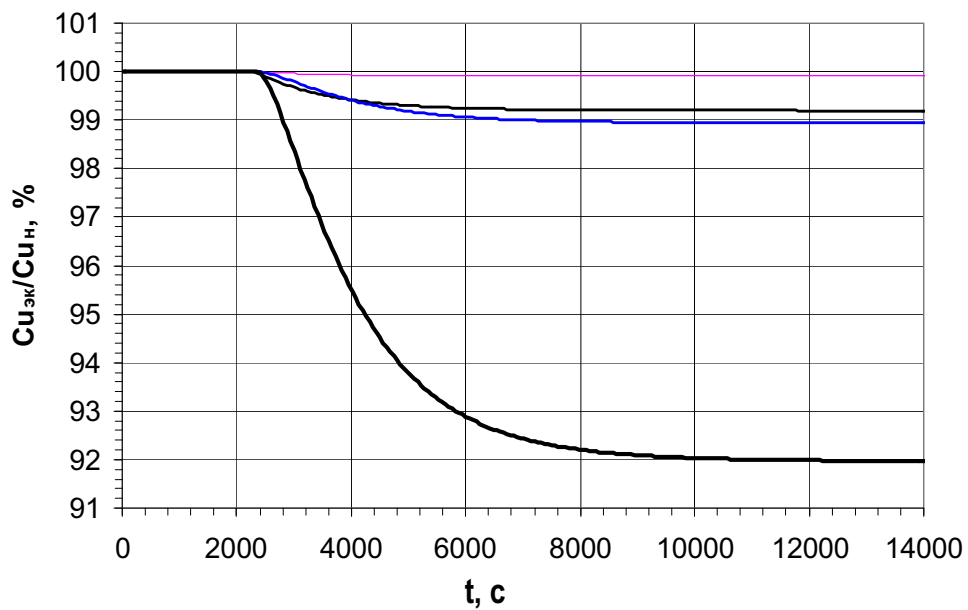


Рис. 5.21. Временная диаграмма относительной концентрации урана в экстракте:

$C_{н}$ – начальная концентрация урана в экстракте;
 — $C_{ВФ1}$; — $C_{ВФ2}$; — $C_{ВФ3}$; — $C_{ВФ4}$

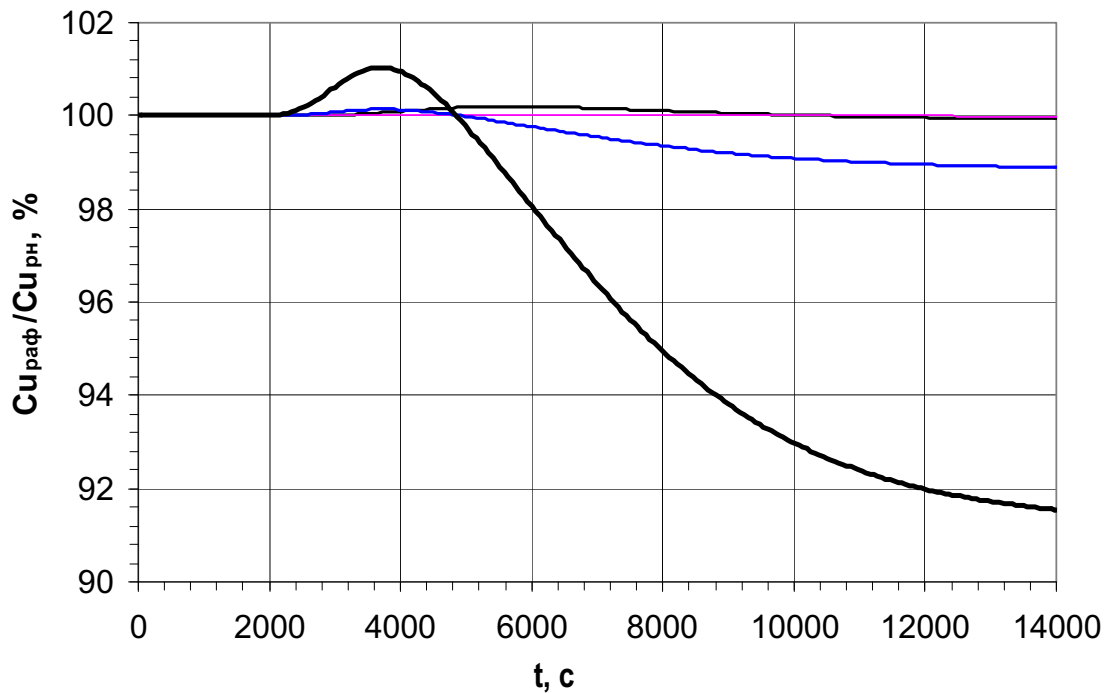


Рис. 5.22. Временная диаграмма относительной концентрации урана в рафинате:

$Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в рафинате;
 — $Cu_{ВФ1}$; — $Cu_{ВФ2}$; — $Cu_{ВФ3}$; — $Cu_{ВФ4}$

5.3.3. Исследование влияния ОФ на контролируемые переменные колонны

В данном эксперименте производилось ступенчатое изменение расхода ОФ ($\Delta Q_{оф}$) на -6% , как представлено на рис. 5.23. На рис. 5.24 представлена временная диаграмма плотности экстракта ($\rho_{эк}$), на рис. 5.25 – ЗДФН, рис. 5.26 – ЗДФВ, рис. 5.27 – относительная концентрация урана в экстракте ($Cu_{эк}/Cu_{н}$), рис. 5.28 – относительная концентрация урана в рафинате ($Cu_{раф}/Cu_{рн}$), где $Cu_{н}$ – начальная концентрация урана в экстракте, $Cu_{рн}$ – в рафинате.

Рассмотренные переходные процессы восстановлены при помощи апериодического звена первого порядка с запаздыванием:

$$W_o^{qo}(s) = \frac{k_o^{qo}}{T_o^{qo}s + 1} \cdot e^{-\tau_o^{qo}s}, \quad (5.15)$$

где k_o^{qo} – коэффициент передачи по расходу ОФ; T_o^{qo} – постоянная времени, с; τ_o^{qo} – чистое (транспортное) запаздывание, с.

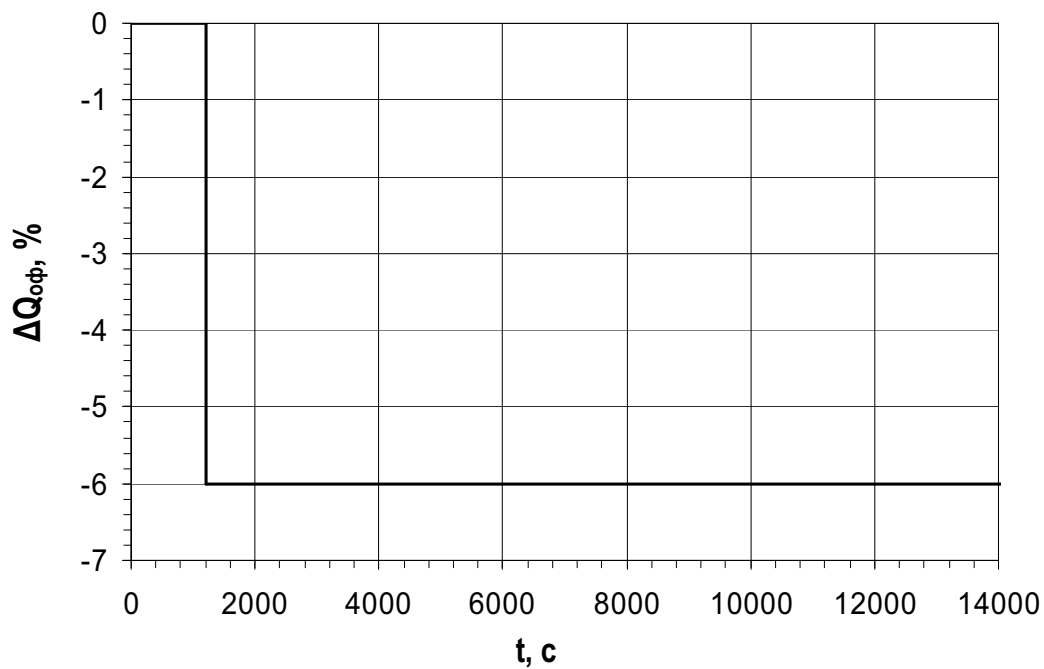


Рис. 5.23. Ступенчатое воздействие (по расходу ОФ)

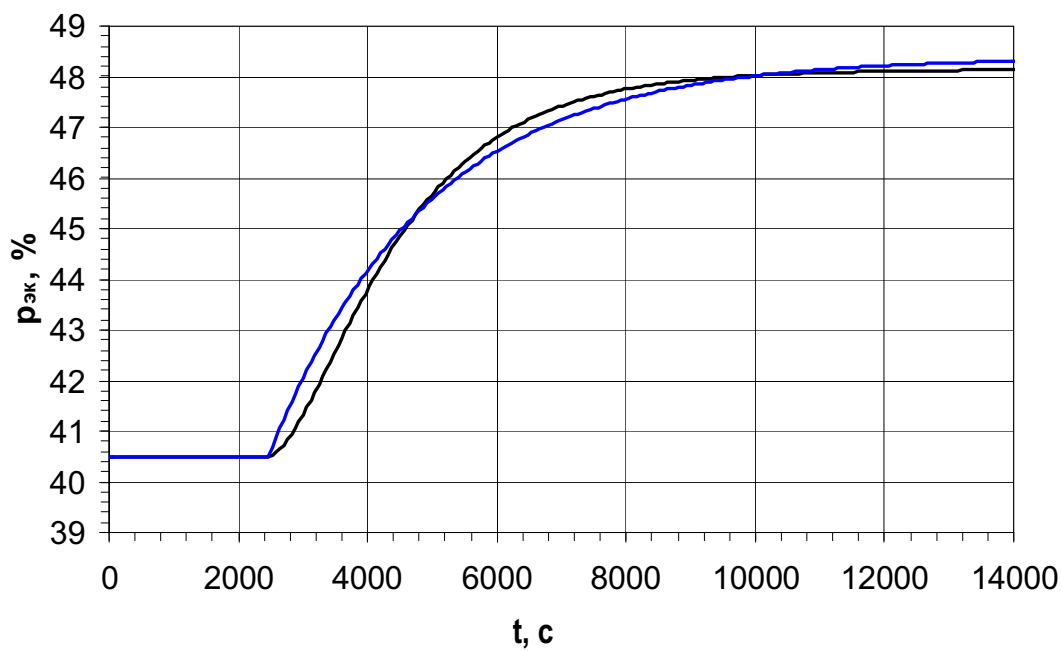


Рис. 5.24. Временная диаграмма плотности экстракта:

— модель; — аппроксимация

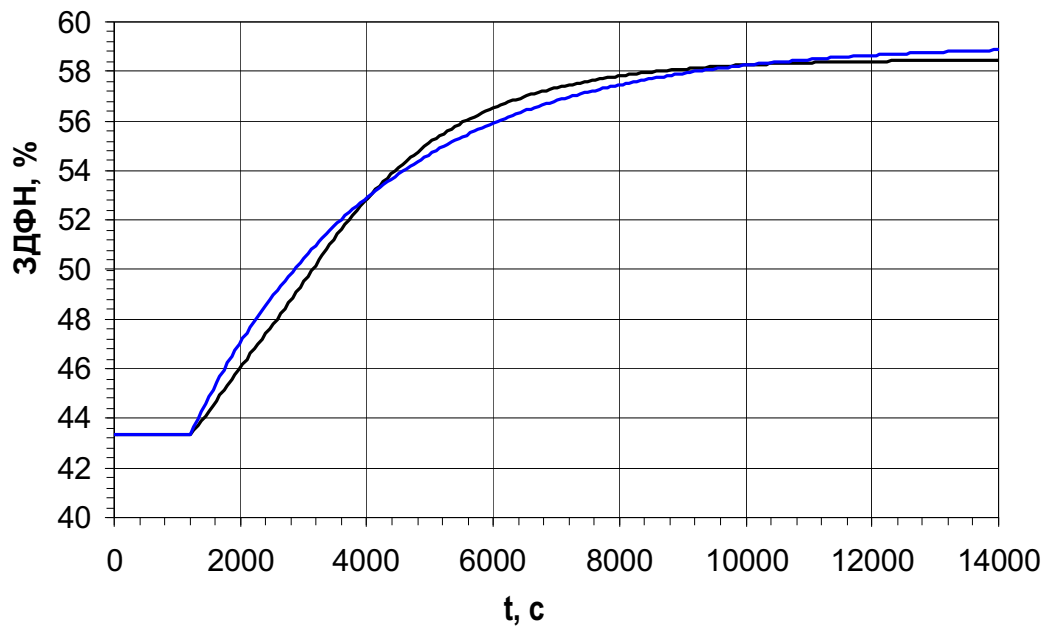


Рис. 5.25. Временная диаграмма ЗДФН:
 — модель; — аппроксимация

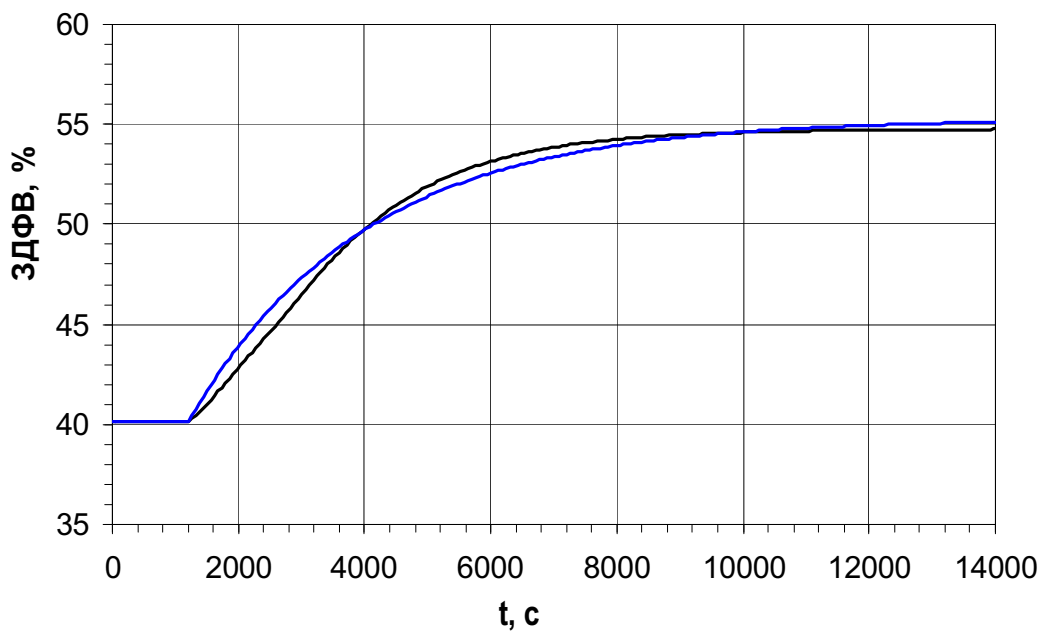


Рис. 5.26. Временная диаграмма ЗДФВ:
 — модель; — аппроксимация

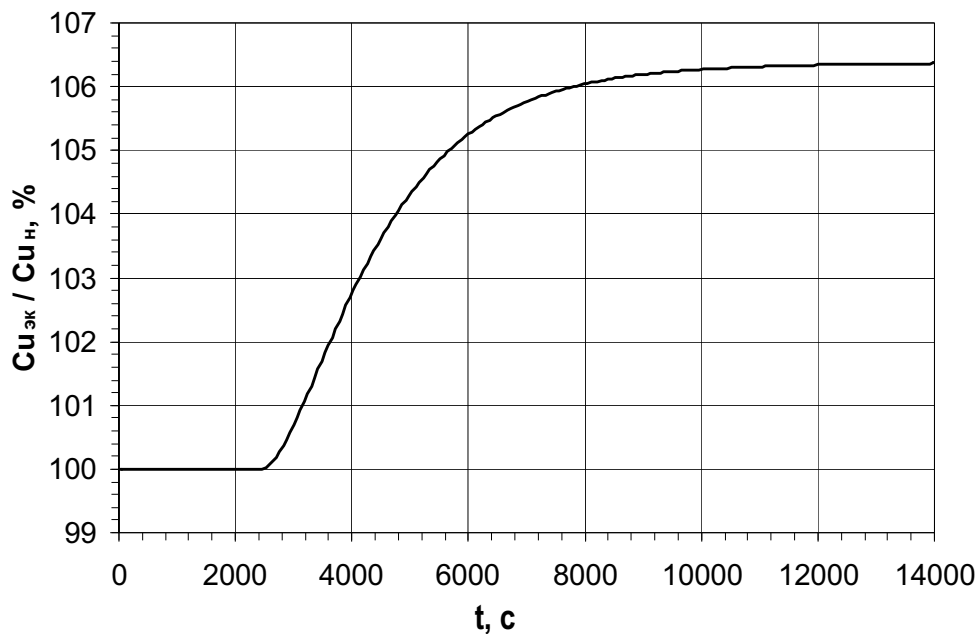


Рис. 5.27. Временная диаграмма относительной концентрации урана в экстракте:
 $Cu_{н}$ – начальная концентрация урана в экстракте

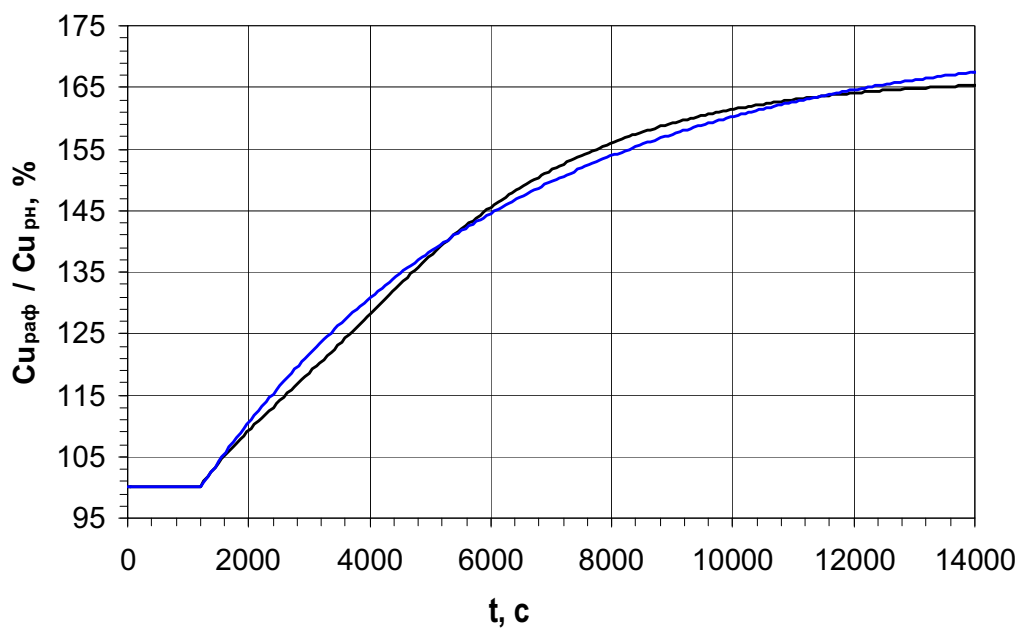


Рис. 5.28. Временная диаграмма относительной концентрации урана в раффinate:
 $Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в раффinate;
 — модель; — аппроксимация

5.3.4. Исследование влияния амплитуды пульсаций на переменные колонны

Для упрощения моделирования и анализа ступенчатое воздействие подавалось непосредственно на внутренний параметр имитационной модели a – двойная амплитуда пульсаций столба жидкости (разд. 3.2.6).

На рис. 5.29 представлена временная диаграмма изменения двойной амплитуды пульсаций (Δa). На рис. 5.30 представлена временная диаграмма плотности экстракта ($\rho_{\text{эк}}$), рис. 5.31 – ЗДФН, рис. 5.32 – ЗДФВ, рис. 5.33 – концентрация урана в экстракте ($C_{\text{уэк}}/C_{\text{ун}}$), рис. 5.34 – концентрация урана в рафинате ($C_{\text{ураф}}/C_{\text{урн}}$), рис. 5.35 – относительный расход рафината ($Q_{\text{рф}}/Q_{\text{н}}$), где $C_{\text{ун}}$ – начальная концентрация урана в экстракте; $C_{\text{урн}}$ – начальная концентрация урана в рафинате; $Q_{\text{н}}$ – начальный суммарный расход ВФ1...ВФ4.

Представленные переходные процессы по переменным: плотность экстракта, концентрация урана в рафинате и расход рафината можно описать инерционным звеном второго порядка с дифференцированием [42, 48], причем в канале плотность экстракта присутствует чистое запаздывание:

$$W_o^a(s) = \frac{k_o^a \cdot s}{(T1_o^a \cdot s + 1) \cdot (T2_o^a \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau_o^a s}, \quad (5.16)$$

где k_o^a – коэффициент передачи по возмущению Δa , с; $T1_o^a$, $T2_o^a$ – постоянные времени по возмущению Δa , с; τ_o^a – чистое запаздывание, с.

Переходные процессы по параметрам: ЗДФН и ЗДФВ можно описать апериодическим звеном первого порядка [42, 48]:

$$W_o^a(s) = \frac{k_o^a}{T_o^a \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_o^a s}, \quad (5.17)$$

где k_o^a – коэффициент передачи по возмущению Δa ; T_o^a – постоянная времени по возмущению Δa , с; τ_o^a – чистое запаздывание, с.

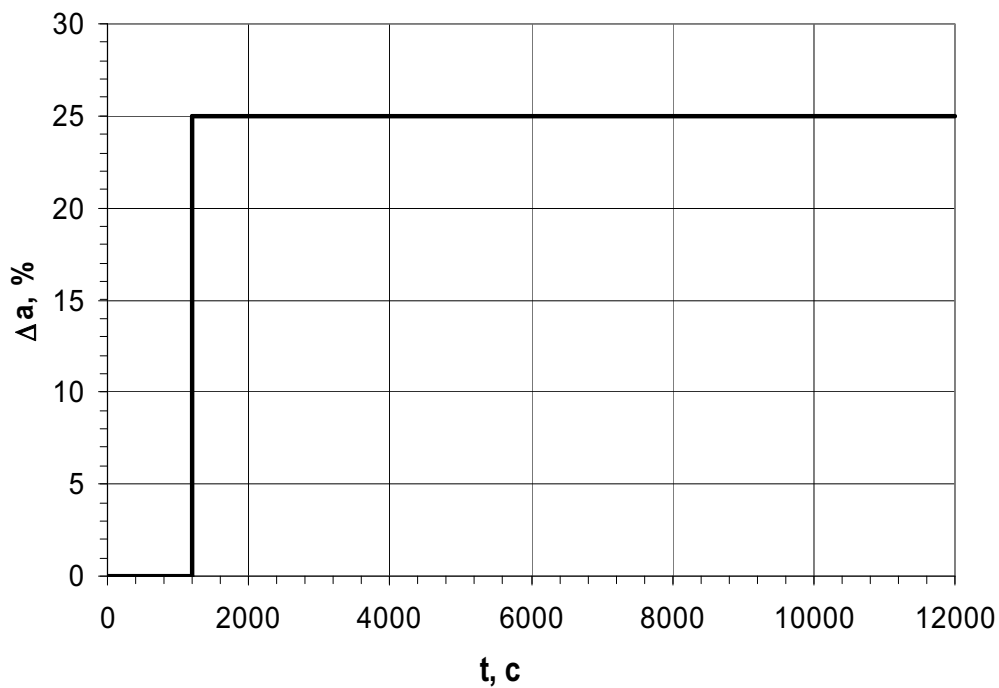


Рис. 5.29. Ступенчатое воздействие по двойной амплитуде пульсаций

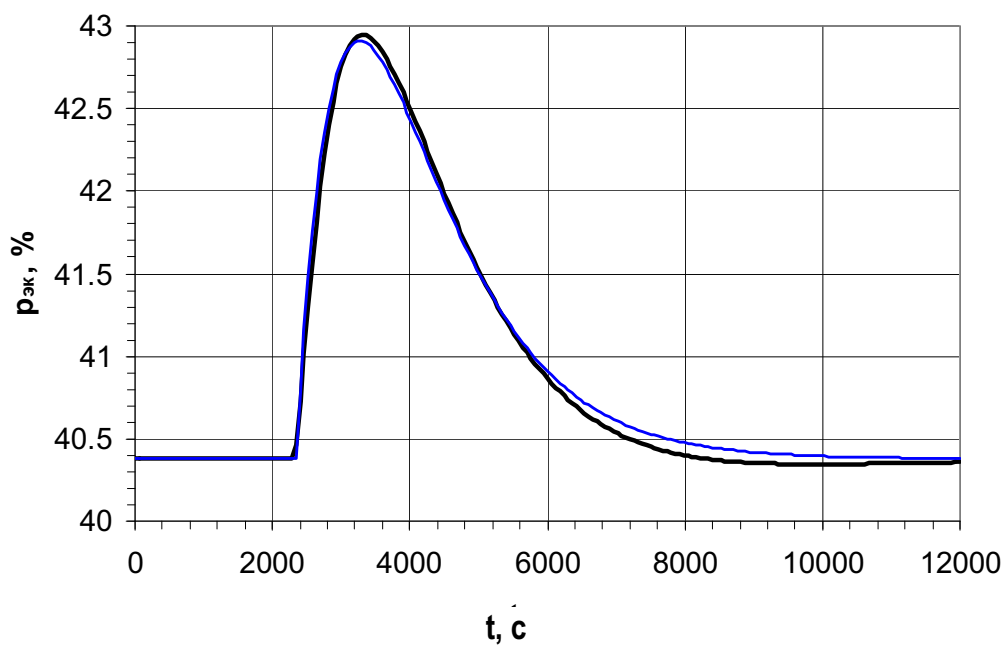


Рис. 5.30. Временная диаграмма плотности экстракта:
— модель; — аппроксимация

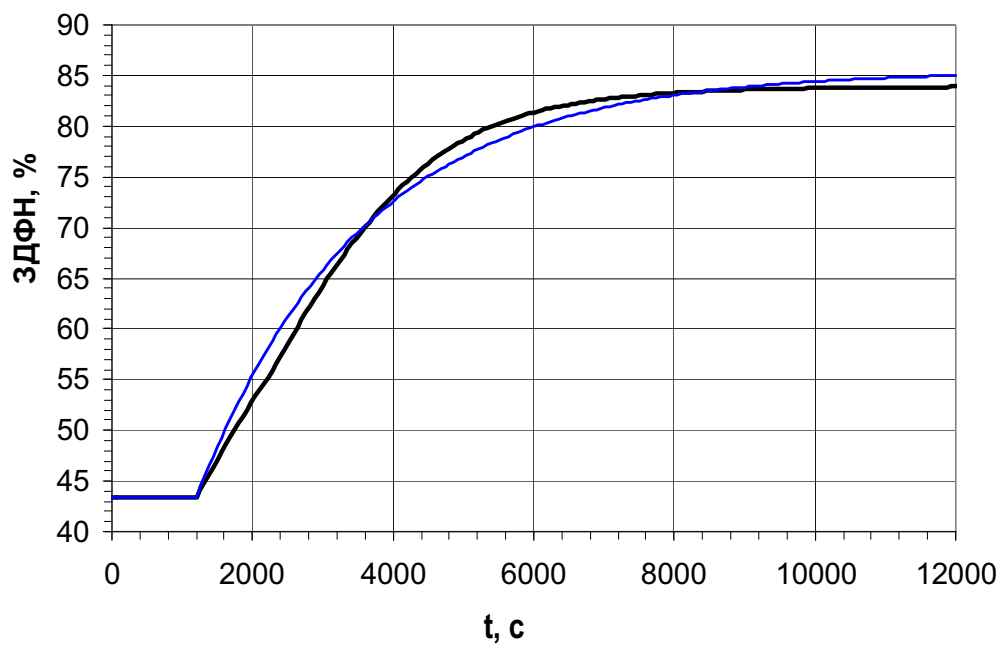


Рис. 5.31. Временная диаграмма ЗДФН:
 — модель; — аппроксимация

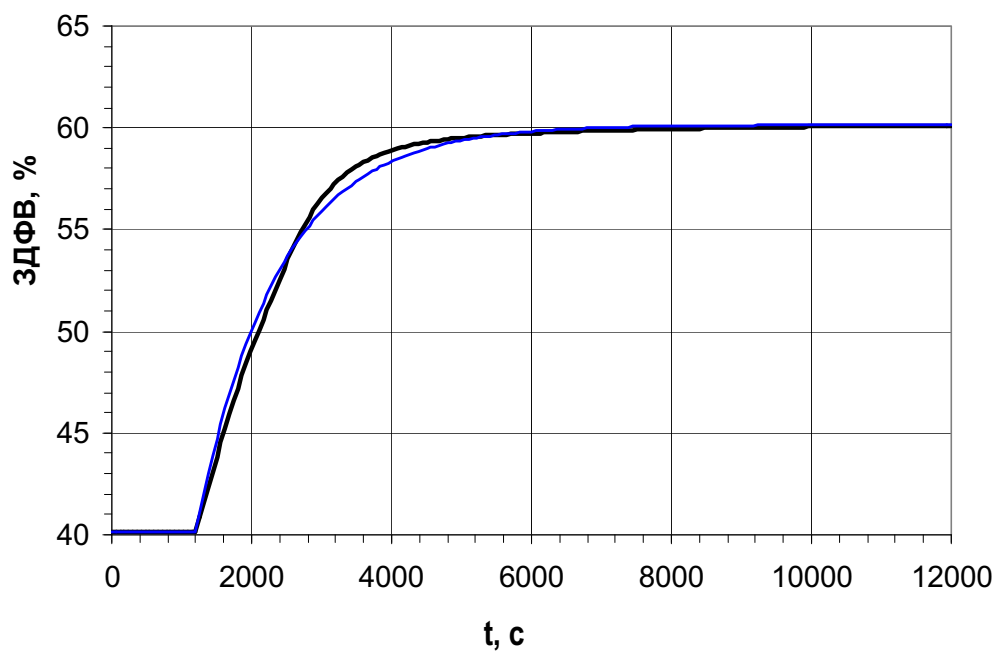


Рис. 5.32. Временная диаграмма ЗДФВ:
 — модель; — аппроксимация

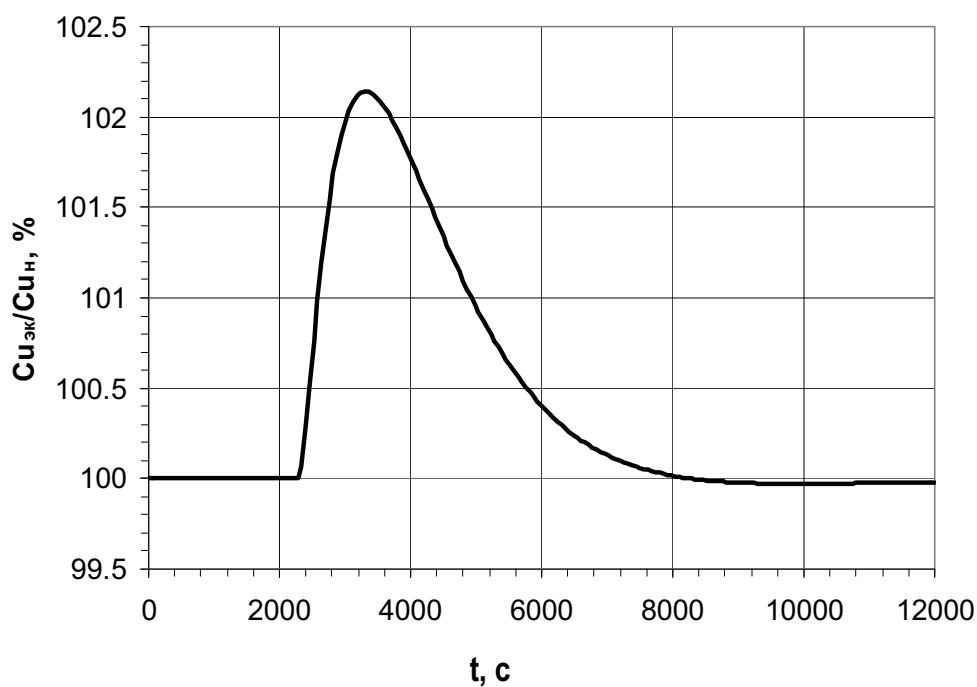


Рис. 5.33. Временная диаграмма относительной концентрации урана в экстракте:
 Cu_H – начальная концентрация урана в экстракте

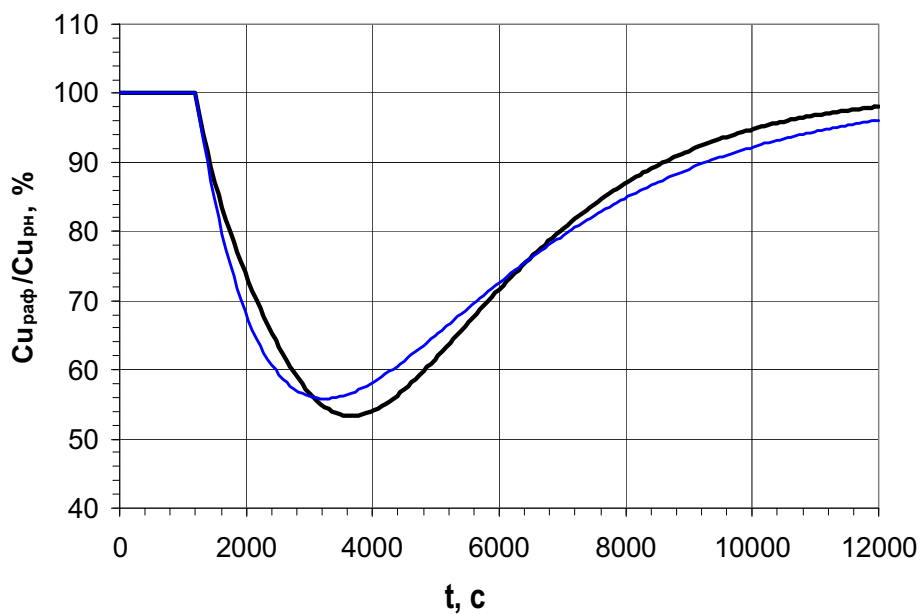


Рис. 5.34. Временная диаграмма относительной концентрации урана в раффинате:
 $Cu_{рн}$ – начальная концентрация урана в раффинате;
 — модель; — аппроксимация

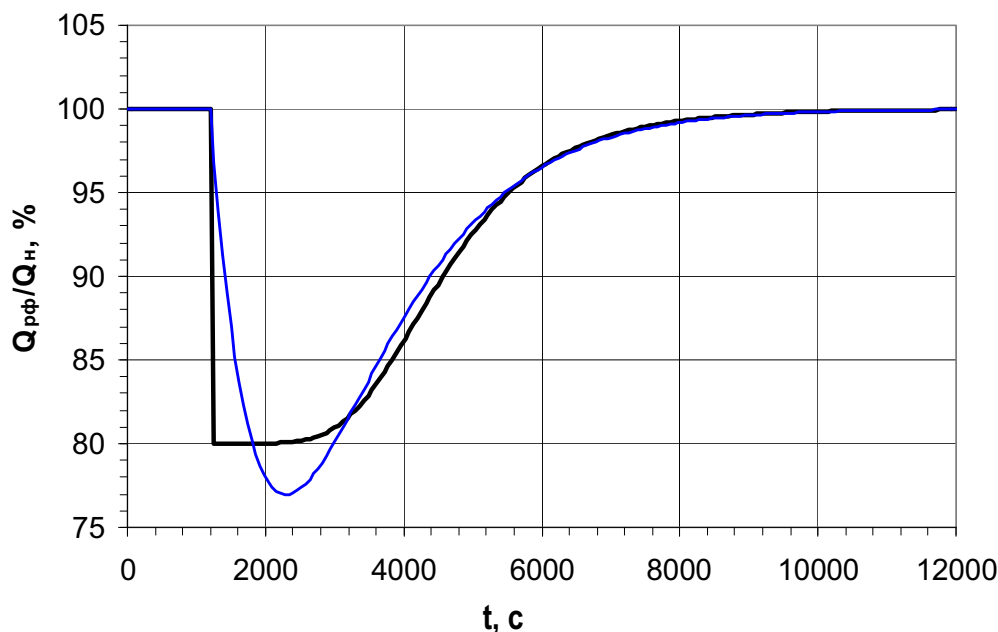


Рис. 5.35. Временная диаграмма относительного расхода рафината:
 Q_n – начальный расход рафината;
 — модель; — аппроксимация

5.4. Исследование влияния распределения урана по высоте колонны на ее параметры и контролируемые переменные

Исследование влияния распределения урана на переменные экстракционной колонны можно выполнить на примере двух режимов работы: первый цикл экстракционной очистки; второй цикл экстракционной очистки.

При работе во втором цикле на очищенной от радиоактивных компонентов экстракционной колонне имеется возможность установки индикатора концентрации урана – показателя концентрации металла (ПКМ-1Д). Установка датчика происходит на расстоянии 2,6 м от кольца ввода ОФ. Для моделирования показаний ПКМ можно использовать среднюю концентрацию урана в 8-й ступени (Cu_8) имитационной модели колонны. При этом изменение показаний ПКМ соответствует изменению относительной концентрации урана в рафинате колонны.

Пример распределения концентрации урана (Cu) по высоте колонны (H) для первого и второго цикла представлен на рис. 5.36. Исследования влияния параметров ВФ1, ВФ2, ВФ3, ВФ4 и ОФ, а также амплитуды пульсаций на основные контролируемые переменные головной колонны – плотность экстракта, концентрация урана в рафинате, ЗДФВ, ЗДФН и концентрация урана по ПКМ (во втором цикле) произ-

водилось на компьютерной модели головной колонны с распределениями урана по высоте колонны, представленными на рис. 5.36.

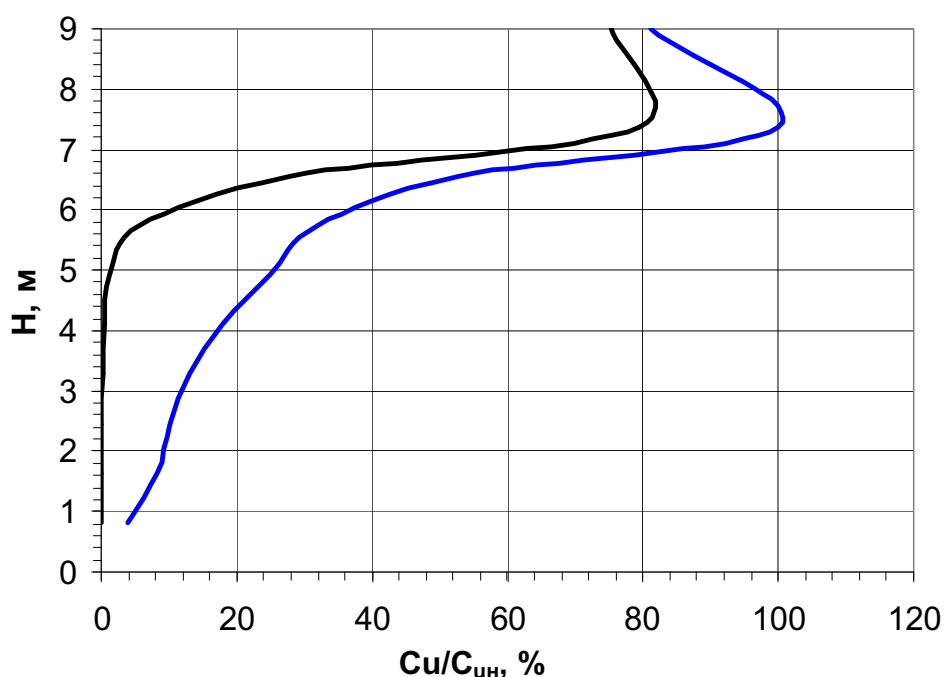


Рис. 5.36. Распределение концентрации урана по высоте ЭК1 для 1-го и 2-го цикла экстракционной очистки:
 $C_{ин}$ – концентрация урана во второй ступени;
 — 1-й цикл; — 2-й цикл

5.4.1. Исследование влияния параметров ВФ3, ВФ4, ОФ на переменные колонны во втором цикле экстракционной очистки

Исследования проводились так же, как и в разд. 5.3. Переходные процессы получились такими же по форме, как в первом цикле экстракционной очистки, и отличаются только динамическими характеристиками. Для данных переходных процессов также была выполнена аппроксимация типовыми звеньями (той же структуры).

На рис. 5.37 представлена временная диаграмма изменения расхода ВФ4, на рис. 5.38 – плотность экстракта ($\rho_{эк}$), рис. 5.39 – ЗДФН, рис. 5.40 – ЗДФВ для 1-го и 2-го цикла, соответственно.

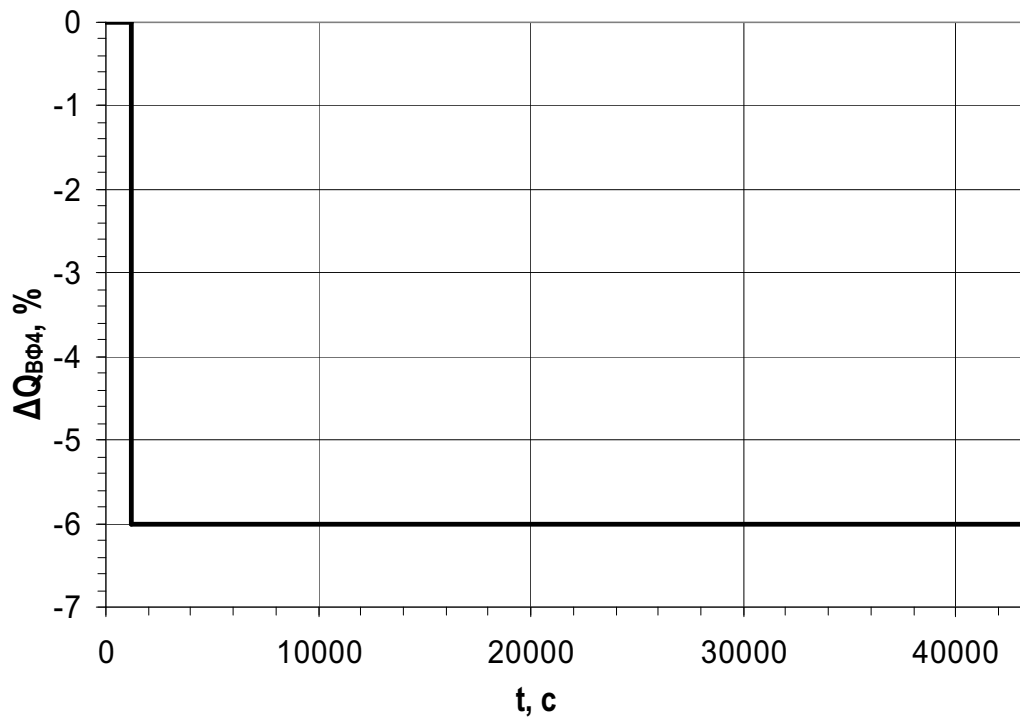


Рис. 5.37. Ступенчатое воздействие по расходу ВФ4

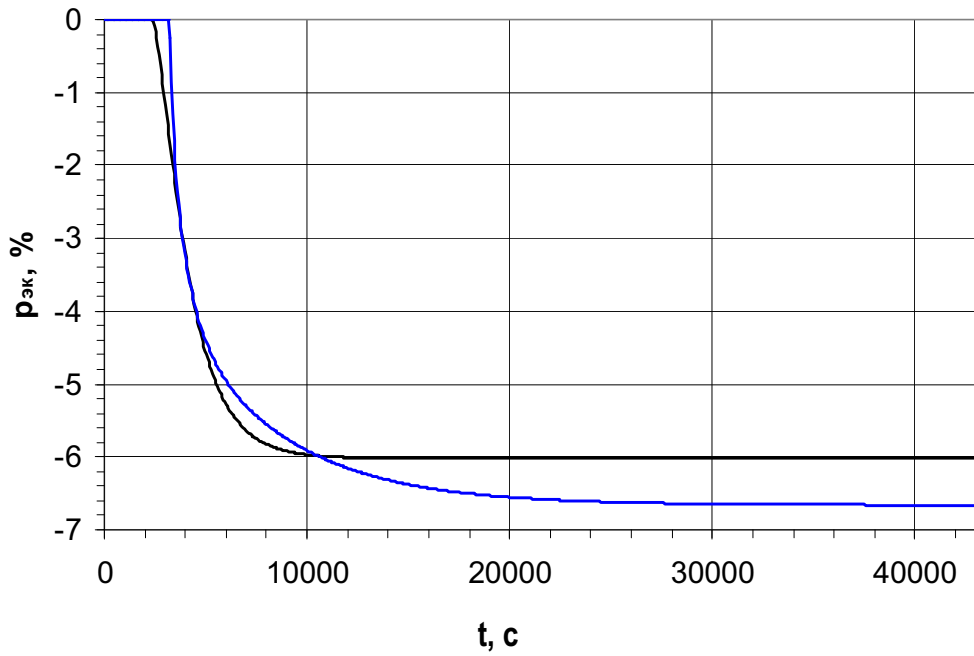


Рис. 5.38. Временная диаграмма плотности экстракта:
 — 1-й цикл; — 2-й цикл

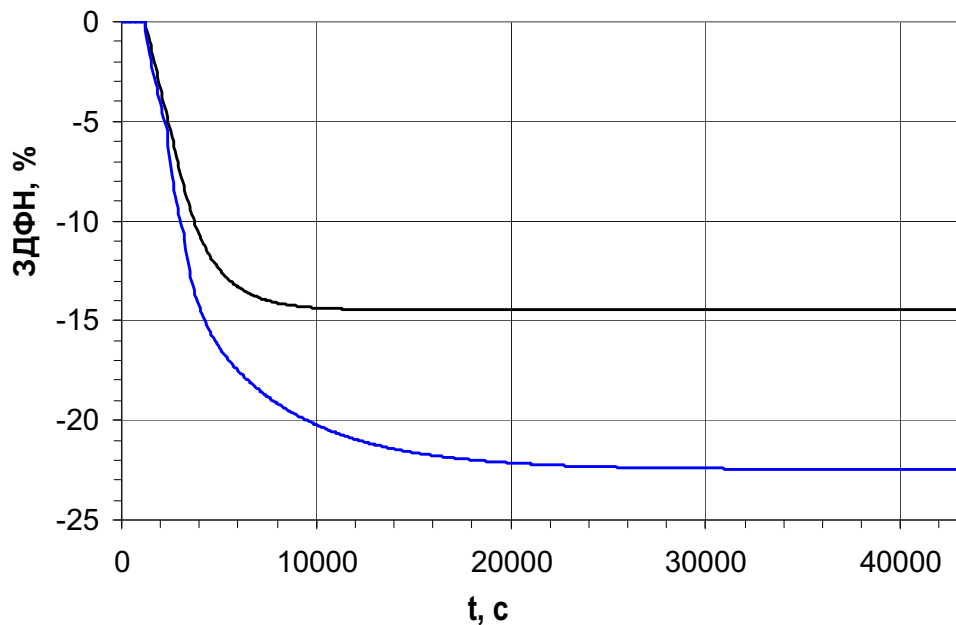


Рис. 5.39. Временная диаграмма ЗДФН:
 — 1-й цикл; — 2-й цикл

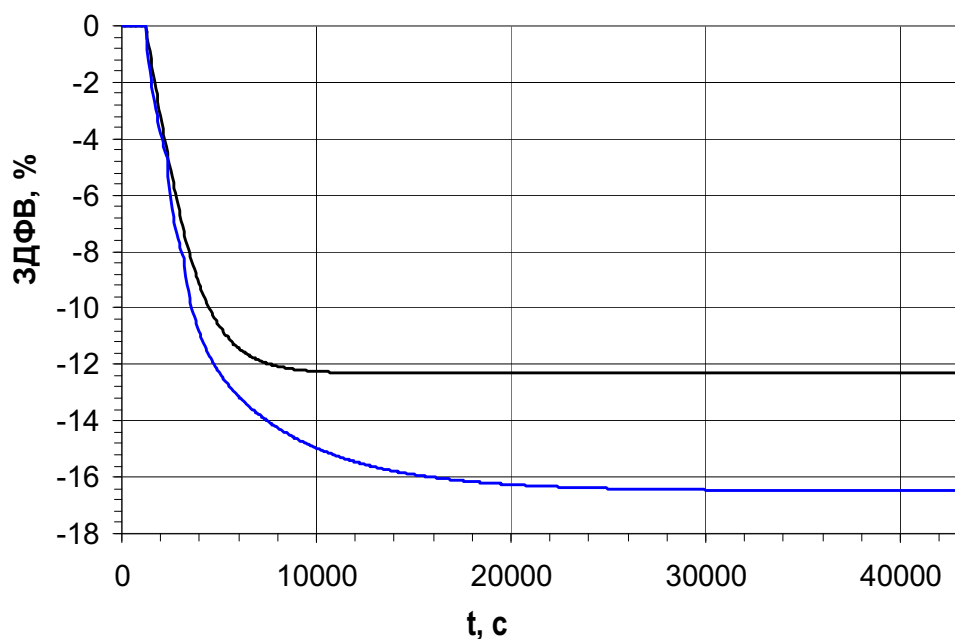


Рис. 5.40. Временная диаграмма ЗДФВ:
 — 1-й цикл; — 2-й цикл

Приведенное (к установившемуся значению) среднеквадратичное отклонение [41] переходных процессов во 2-м цикле от 1-го в среднем составило 38,5 %. Временные характеристики переходных процессов также отличаются на 40–50 %.

5.4.2. Исследование влияния амплитуды пульсаций на переменные колонны во втором цикле экстракционной очистки

Исследования проводились аналогичным образом как в разд. 5.3.4. Переходные процессы получились такие же по форме, как в первом цикле экстракционной очистки, и отличаются только динамическими характеристиками. Для данных переходных процессов также была выполнена аппроксимация типовыми звеньями (той же структуры).

Однако имеется и существенные отличия по некоторым параметрам, а именно по плотности экстракта и по показаниям ПКМ (в первом цикле отсутствует). В первом цикле влияния амплитуды пульсаций на плотность экстракта описывается инерционным звеном второго порядка с дифференцированием (5.16), а во втором цикле переходный процесс уже нельзя описать звеном (5.16).

На рис. 5.41 представлена временная диаграмма амплитуды пульсаций (ступенчатого воздействия), а на рис. 5.42 – временная диаграмма плотности экстракта.

Переходный процесс по плотности экстракта (рис. 5.42) можно описать следующей передаточной функцией, построенной на базе типовых звеньев [42, 48]:

$$W_{\rho}^a(s) = \frac{k_{\rho}^a \cdot s \cdot (T1_{\rho}^a \cdot s + 1)}{(T2_{\rho}^a \cdot s + 1) \cdot (T3_{\rho}^a \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau_{\rho}^a \cdot s}, \quad (5.18)$$

где k_{ρ}^a – коэффициент передачи по возмущению Δa ; $T1_{\rho}^a$, $T2_{\rho}^a$, $T3_{\rho}^a$ – постоянные времени по возмущению Δa , с; τ_{ρ}^a – чистое запаздывание, с.

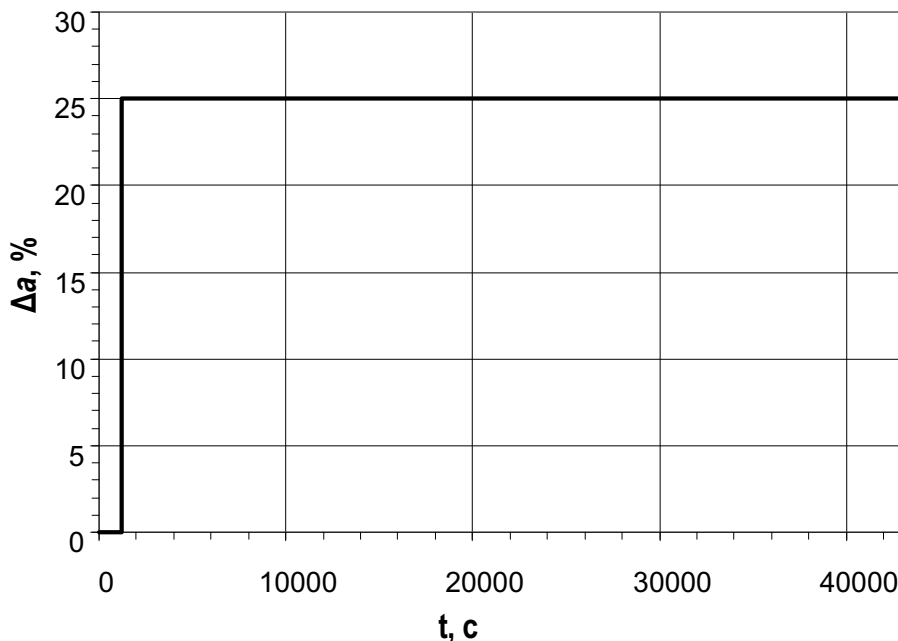


Рис. 5.41. Ступенчатое воздействие по амплитуде пульсаций жидкости в колонне

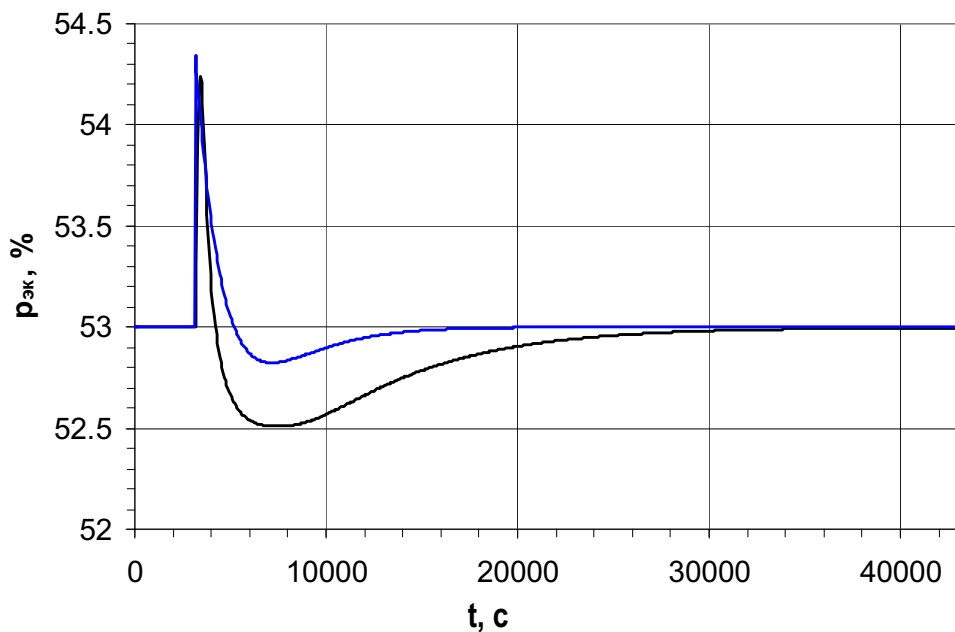


Рис. 5.42. Временная диаграмма плотности экстракта:
 — модель; — аппроксимация

На рис. 5.43 представлен переходный по показаниям ПКМ при ступенчатом воздействии по амплитуде пульсаций.

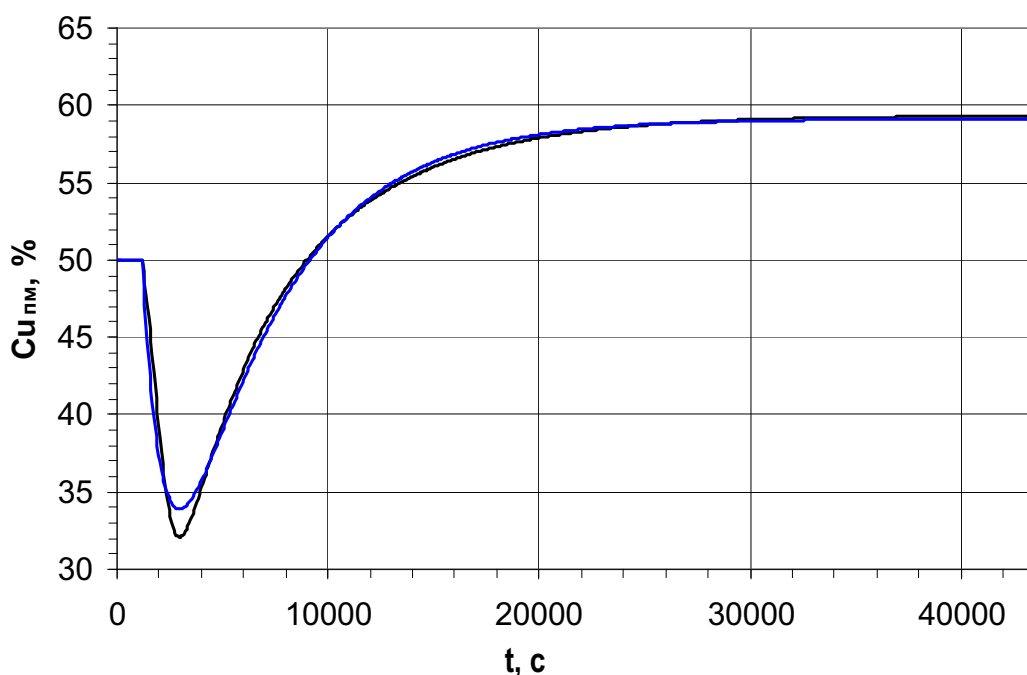


Рис. 5.43. Временная диаграмма концентрации урана по ПКМ:
 — модель; — аппроксимация

Переходный процесс, представленный на рис. 5.43, можно описать передаточной функцией, построенной на базе типовых звеньев:

$$W_{\text{пм}}^a(s) = \frac{k_{\text{пм}}^a \cdot (1 - T1_{\text{пм}}^a \cdot s)}{(T2_{\text{пм}}^a \cdot s + 1) \cdot (T3_{\text{пм}}^a \cdot s + 1)}, \quad (5.19)$$

где $k_{\text{пм}}^a$ – коэффициент передачи по возмущению Δa ; $T1_{\text{пм}}^a$, $T2_{\text{пм}}^a$, $T3_{\text{пм}}^a$ – постоянные времени по возмущению Δa , с.

Остальные переходные процессы аналогичны тем, что рассмотрены в разд. 5.3.4, описываются апериодическим звеном первого порядка (5.17).

5.5. Выводы по результатам исследований имитационной модели экстракционной колонны

1. Характеристики входных потоков ВФ и ОФ, а также амплитуда пульсаций жидкости существенно влияют на контролируемые переменные. Причем это влияние на порядок больше по сравнению с влиянием на положение фронта распределения концентрации урана по высоте колонны. Наибольшую степень влияния на контролируемые переменные ЭК1 оказывает ВФ4 и ОФ, наименьшую ВФ2 и ВФ1 (в 10 раз меньше, чем ВФ4), а ВФ3 – сопоставимую с ВФ4 (30 % от ВФ4 в первом цикле).

2. Возмущения по амплитуде пульсаций жидкости в ЭК1 приводят к изменению соотношения фаз в колонне. Причем увеличение амплитуды пульсаций дает увеличение объема дисперсной фазы за счет снижения скорости погружения капель, что, в свою очередь, увеличивает среднюю плотность жидкости в колонне – происходит рост уровня ЗДФН и ЗДФВ. Однако допустимое (не приводящее к инверсии фаз) возмущение по амплитуде пульсаций не приводит к изменению концентрации урана в экстракте и рафинате, происходит лишь кратковременное отклонение этих концентраций от стационарного уровня.

3. Распределение концентрации урана по высоте ЭК1 существенно влияет на динамические характеристики контролируемых переменных ЭК1 и требует изменения структуры и параметров линейной модели. Различия в этих характеристиках (между первым и вторым циклом экстракционной очистки) достигают более 50 %.

4. Режим работы пульс-камеры ЭК1 существенным образом влияет на пульсацию жидкости в колонне и на контролируемые переменные ЭК1.

Статические и динамические связи контролируемых переменных ЭК1 с параметрами потоков ВФ и ОФ, а также с амплитудой пульсаций жидкости в колонне описаны с помощью линейной математической модели.

5. Взаимосвязь основных контролируемых переменных ЭК1 с параметрами потоков (расходы и концентрации урана) ВФ1...ВФ4, ОФ и амплитудой пульсаций жидкости в пределах одного режима работы можно описать моделью на основе типовых линейных звеньев с приемлемой погрешностью менее 10 %.

5.6. Линейная математическая модель экстракционной колонны

Вычислительные эксперименты по исследованию переходных функций на разработанной компьютерной модели (разделы 5.3, 5.4) позволили получить линейную динамическую модель путем аппроксимации ее переходных функций решениями соответствующих линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Линейная модель воспроизводит переходные процессы в диапазоне $\pm 20\%$ от регламентных значений переменных с погрешностью не более 10% и может быть использована для синтеза алгоритмов управления процессом в головной колонне. Линейная динамическая модель головной колонны описывается уравнением в матричной форме [23, 42, 43], связывает характеристики потоков ВФ1...ВФ4 и амплитуду пульсаций с основными контролируруемыми переменными экстракционной колонны:

$$\overline{Y}(s) = \overline{W}_{\text{ЭК}}^q(s) \cdot \overline{Q}(s) + \overline{W}_{\text{ЭК}}^{cu}(s) \cdot \overline{Cu}(s) + \overline{W}_{\text{ЭК}}^a(s) \cdot a(s), \quad (5.20)$$

где

$$\overline{Q}(s) = \begin{bmatrix} Q_{\text{ВФ1}}(s) \\ Q_{\text{ВФ2}}(s) \\ Q_{\text{ВФ3}}(s) \\ Q_{\text{ВФ4}}(s) \\ Q_{\text{ОФ}}(s) \end{bmatrix}, \quad \overline{Cu}(s) = \begin{bmatrix} Cu_{\text{ВФ1}}(s) \\ Cu_{\text{ВФ2}}(s) \\ Cu_{\text{ВФ3}}(s) \\ Cu_{\text{ВФ4}}(s) \\ 0 \end{bmatrix} - \quad (5.21)$$

векторы-столбцы изображений входных расходов ВФ1...ВФ4, ОФ, % и концентраций урана в них, %; $a(s)$ – изображение амплитуды пульсаций;

$$\overline{W}_{\text{ЭК}}^q(s) = \begin{bmatrix} W_{\rho}^{q1}(s) & W_{\rho}^{q2}(s) & W_{\rho}^{q3}(s) & W_{\rho}^{q4}(s) & W_{\rho}^{qo}(s) \\ W_{\text{ЗН}}^{q1}(s) & W_{\text{ЗН}}^{q2}(s) & W_{\text{ЗН}}^{q3}(s) & W_{\text{ЗН}}^{q4}(s) & W_{\text{ЗН}}^{qo}(s) \\ W_{\text{ЗВ}}^{q1}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{q2}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{q3}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{q4}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{qo}(s) \\ W_{\text{СР}}^{q1}(s) & W_{\text{СР}}^{q2}(s) & W_{\text{СР}}^{q3}(s) & W_{\text{СР}}^{q4}(s) & W_{\text{СР}}^{qo}(s) \\ W_{\text{ПМ}}^{q1}(s) & W_{\text{ПМ}}^{q2}(s) & W_{\text{ПМ}}^{q3}(s) & W_{\text{ПМ}}^{q4}(s) & W_{\text{ПМ}}^{qo}(s) \end{bmatrix} - \quad (5.22)$$

матричная передаточная функция экстракционной колонны по расходам ВФ1...ВФ4, ОФ (по управлению);

$$\overline{W}_{\text{ЭК}}^{cu}(s) = \begin{bmatrix} W_{\rho}^{cu1}(s) & W_{\rho}^{cu2}(s) & W_{\rho}^{cu3}(s) & W_{\rho}^{cu4}(s) & 0 \\ W_{\text{ЗН}}^{cu1}(s) & W_{\text{ЗН}}^{cu2}(s) & W_{\text{ЗН}}^{cu3}(s) & W_{\text{ЗН}}^{cu4}(s) & 0 \\ W_{\text{ЗВ}}^{cu1}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{cu2}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{cu3}(s) & W_{\text{ЗВ}}^{cu4}(s) & 0 \\ W_{\text{СР}}^{cu1}(s) & W_{\text{СР}}^{cu2}(s) & W_{\text{СР}}^{cu3}(s) & W_{\text{СР}}^{cu4}(s) & 0 \\ W_{\text{ПМ}}^{cu1}(s) & W_{\text{ПМ}}^{cu2}(s) & W_{\text{ПМ}}^{cu3}(s) & W_{\text{ПМ}}^{cu4}(s) & 0 \end{bmatrix} - \quad (5.23)$$

матричная передаточная функция экстракционной колонны по концентрации урана в ВФ1...ВФ4 (по возмущению);

$$\overline{W}_{\text{ЭК}}^a(s) = \begin{bmatrix} W_{\rho}^a(s) \\ W_{\text{ЗН}}^a(s) \\ W_{\text{ЗВ}}^a(s) \\ W_{\text{СР}}^a(s) \\ W_{\text{ПМ}}^a(s) \end{bmatrix} - \quad (5.24)$$

матричная передаточная функция экстракционной колонны по амплитуде пульсаций (по возмущению);

$$\overline{Y}(s) = \begin{bmatrix} \rho_{\text{ЭК}}(s) \\ L_{\text{ЗДФ}}^{\text{низ}}(s) \\ L_{\text{ЗДФ}}^{\text{верх}}(s) \\ Cu_{\text{раф}}(s) \\ Cu_{\text{ПМ}}(s) \end{bmatrix} - \quad (5.25)$$

вектор регулируемых (контролируемых) переменных ЭК1, где $\rho_{\text{ЭК}}$ – плотность экстракта; $L_{\text{ЗДФ}}^{\text{низ}}$ – ЗДФН; $L_{\text{ЗДФ}}^{\text{верх}}$ – ЗДФВ; $Cu_{\text{раф}}$ – концентрация урана в рафинате; $Cu_{\text{ПМ}}(s)$ – концентрация урана по показаниям ПКМ. Все координаты, входящие в вектора и матрицы, являются изображениями функций времени, где s – оператор Лапласа [47, 43, 44].

Линейная математическая модель на примере головной экстракционной колонны установки «Утес» (для 1-го и 2-го циклов экстракционной очистки) в матричном виде (5.20) проиллюстрирована на рис. 5.44.

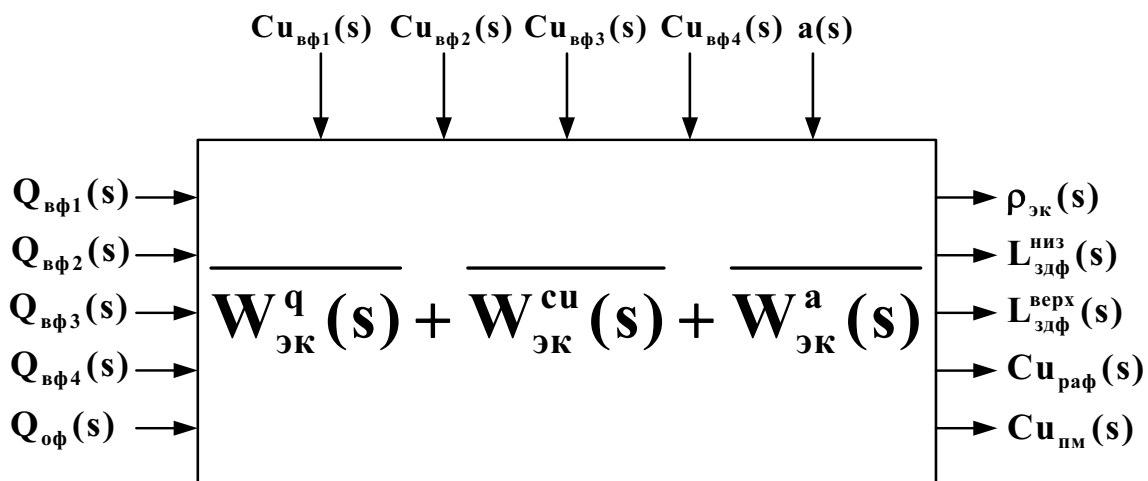


Рис. 5.44. Линейная математическая модель головной экстракционной колонны

Таким образом, статические и динамические связи контролируемых переменных головной экстракционной колонны с параметрами

потоков ВФ и ОФ, а также с амплитудой пульсаций жидкости в колонне описаны с помощью линейной математической модели.

Передаточные функции, используемые в линейной модели ЭК1, представлены в табл. 5.5 и 5.6, а их параметры в табл. 5.7 и 5.8.

При синтезе САУ можно использовать упрощенную (линейную) модель колонны (5.20), исполнительные механизмы и датчики рассматривать как линейные, безынерционные. Моделирование производить с использованием сложной (полной) имитационной модели колонны (разд. 3), но с идеализированными регуляторами и исполнительными механизмами с учетом их инерционности. Такая последовательность подходит для наиболее быстрого выбора подходящей структуры САУ (законы регулирования, контура регулирования и т. д.).

Влияние нелинейностей исполнительных механизмов и регуляторов, датчиков на качество регулирования и способы линеаризации необходимо рассматривать отдельно уже для правильно выбранной структуры САУ колонной. Причем следует отметить, что нелинейности исполнительных механизмов и регулятора делают систему не работоспособной в худшем случае, либо существенно снижают качество регулирования.

Таблица 5.5

Типы звеньев линейной модели головной экстракционной колонны (часть 1)

Выходные переменные / Входные переменные	Плотность экстракта (ρ)	Концентрация урана по ПКМ (пм)
Расходы ВФ1...ВФ4, ОФ (qi)	$\frac{k_{\rho}^{qi}}{T_{\rho}^{qi} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{\rho}^{qi} \cdot s}$	$\frac{k_{\text{пм}}^{qi}}{T_{\text{пм}}^{qi} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{\text{пм}}^{qi} \cdot s}$
Концентрация урана (cui) в ВФ1...ВФ4	$\frac{k_{\rho}^{cui}}{T_{\rho}^{cui} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{\rho}^{cui} \cdot s}$	$\frac{k_{\text{пм}}^{cui}}{T_{\text{пм}}^{cui} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{\text{пм}}^{cui} \cdot s}$
Амплитуда пульсаций столба жидкости в ЭК1 (a)	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{\rho}^a \cdot s}{(T1_{\rho}^a \cdot s + 1)(T2_{\rho}^a \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau_{\rho}^a \cdot s}, \text{ 1-й цикл} \\ \frac{k_{\rho}^a \cdot s \cdot (T1_{\rho}^a \cdot s + 1)}{(T2_{\rho}^a \cdot s + 1)(T3_{\rho}^a \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau_{\rho}^a \cdot s}, \text{ 2-й цикл} \end{array} \right.$	$\frac{k_{\text{пм}}^a \cdot s \cdot (1 - T1_{\text{пм}}^a \cdot s)}{(T2_{\text{пм}}^a \cdot s + 1)(T3_{\text{пм}}^a \cdot s + 1)}$

Примечания: k – коэффициент передачи; T , $T1$, $T2$, $T3$ – постоянные времени; τ – чистое (транспортное) запаздывание звеньев линейной модели головной экстракционной колонны.

Таблица 5.6

Типы звеньев линейной модели головной экстракционной колонны
(часть 2)

Выходные переменные Входные переменные	ЗДФН (зн)	ЗДФВ (зв)	Концентрация урана в рафинате (c_p)
Расходы ВФ1...ВФ4, ОФ (qi)	$\frac{k_{3Н}^{qi}}{T_{3Н}^{qi} \cdot s + 1}$	$\frac{k_{3В}^{qi}}{T_{3В}^{qi} \cdot s + 1}$	$\frac{k_{cp}^{qi}}{T_{cp}^{qi} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{cp}^{qi} \cdot s}$
Концентрация урана (c_{ui}) в ВФ1...ВФ4	$\frac{k_{3Н}^{cui}}{T_{3Н}^{cui} \cdot s + 1}$	$\frac{k_{3В}^{cui}}{T_{3В}^{cui} \cdot s + 1}$	$\frac{k_{cp}^{cui}}{T_{cp}^{cui} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{cp}^{cui} \cdot s}$
Амплитуда пуль- саций столба жидкости в ЭК1 (a)	$\frac{k_{3Н}^a}{T_{3Н}^a \cdot s + 1}$	$\frac{k_{3В}^a}{T_{3В}^a \cdot s + 1}$	$\frac{k_{cp}^a \cdot s}{(T1_{cp}^a \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{(T2_{cp}^a \cdot s + 1)}$

Примечания: k – коэффициент передачи; T , $T1$, $T2$, $T3$ – постоянные времени; τ – чистое (транспортное) запаздывание звеньев линейной модели ЭК1; $S_{пр}$ – приведенная к стационарному значению среднеквадратичная погрешность.

Таблица 5.7

Параметры звеньев линейной модели головной экстракционной колонны (часть I)

Пере- менные	Параметры	Единицы	Расходы								Расход ОФ	
			ВФ1	ВФ2	ВФ3		ВФ4		1ц	2ц	1ц	2ц
					1ц	2ц	1ц	2ц				
Плотность экстракта	k_p		0,09	0,01	0,13	0,01	1,03	1,09	1,31	2115	1980	0,42
	$T1_p (T_p)$	с	513	1483	2486	1866	2164	1866	2447	2115	1980	0,42
	$T2_p$	с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$T3_p$	с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	τ_p	с	1140	1140	1140	1980	1140	1980	1320	1980	1980	0,42
	$S_{пр}$	%	0,08	0,01	0,06	0,03	0,45	0,47	0,6	0,6	0,6	0,42
ЗДФ низ	$k_{зн}$		1,1	0,08	0,52	0,09	2,46	3,7	2,62	4139	4139	0,45
	$T_{зн}$	с	2373	1803	2160	4790	2292	3156	2993	4139	4139	0,45
	$S_{пр}$	%	0,39	0,03	0,22	0,01	0,84	0,53	1,1	0,45	0,45	0,45
	$k_{зв}$		0,7	0,05	0,35	0,05	2,09	2,72	2,52	3547	3547	0,55
	$T_{зв}$	с	1673	1443	1910	5399	2190	2905	2779	3547	3547	0,55
	$S_{пр}$	%	0,12	0,01	0,04	0,01	0,59	0,56	1,15	0,55	0,55	0,55
Конц. урана по ПКМ	$k_{пкм}$		-	-	-	0,27	-	6,16	-	8,34	8,34	0,35
	$T1_{пкм} (T_{пкм})$	с	-	-	-	6466	-	5984	-	7275	7275	0,35
	$T2_{пкм}$	с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35
	$T3_{пкм}$	с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35
	$\tau_{пкм}$	с	-	-	-	540	-	540	-	0	0	0,35
	$S_{пр}$	%	-	-	-	0,06	-	1,44	-	0,56	0,56	0,35
Конц. урана в рафинате	$k_{ср}$		2,54	0,16	1,36	0,28	2,95	6,15	12,3	9,69	9,69	0,35
	$T1_{ср} (T_{ср})$	с	1673	1673	1673	5693	1673	5693	5188	6714	6714	0,35
	$T2_{ср}$	с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35
	$\tau_{ср}$	с	1800	1800	1800	600	1800	600	0	0	0	0,35
	$S_{пр}$	%	2,2	0,08	0,53	0,05	1,59	0,84	1,64	0,35	0,35	0,35

Таблица 5.8

Параметры звеньев линейной модели головной экстракционной колонны (часть 2)

Пере- менные	Параметры	Единицы	Концентрации урана								Амплитуда пульсаций жидкости	
			ВФ1	ВФ2	ВФ3		ВФ4		1ц	2ц	1ц	2ц
					1ц	2ц	1ц	2ц				
Плотность экс- тракта	k_p		0,1	0,01		0,13	0,022	0,98	1,92	0,02	1,75	
	$T1_p(T_p)$	с	1349	2164	2085	682	2072	682	987	1,2·10 ⁵		
	$T2_p$	с	-	-	-	-	-	-	874	1894		
	$T3_p$	с	-	-	-	-	-	-	-	2059		
	τ_p	с	1140	1140	1140	1980	1140	1980	1140	1980		
	$S_{пр}$	%	0,01	0,02	0,1	0,01	0,29	0,39	0,14	0,34		
	$k_{эп}$		0,15	0,02	0,24	0,05	1,81	3,89	1,68	0,8		
	$T_{эп}$	с	1989	2292	2548	2133	2529	2133	2360	2333		
	$S_{пр}$	%	0,05	0,01	0,15	0,01	1,1	0,73	2,72	0,67		
	$k_{эв}$		0,15	0,02	0,23	0,04	1,77	3,63	0,8	0,36		
Конц. урана по ПКМ	$T_{эв}$	с	1906	2190	2387	1986	2371	1986	1160	860		
	$S_{пр}$	%	0,07	0,01	0,17	0,01	1,24	1	0,9	0,86		
	$k_{пм}$		-	-	-	0,02	-	1,98	-	0,37		
	$T1_{пм}(T_{пм})$	с	-	-	-	8282	-	8282	-	1,5·10 ⁴		
	$T2_{пм}$	с	-	-	-	-	-	-	-	1036		
	$T3_{пм}$	с	-	-	-	-	-	-	-	4941		
	$\tau_{пм}$	с	-	-	-	540	-	540	-	0		
	$S_{пр}$	%	-	-	-	0,01	-	0,88	-	0,99		
	$k_{ср}$		0,003	0,001	0,79	0,02	0,6	1,73	-0,01	-8036		
	$T1_{ср}(T_{ср})$	с	1673	1673	1673	9603	1673	9603	2698	4154		
Конц. урана в рафинате	$T2_{ср}$	с	-	-	-	-	-	-	1576	807		
	$\tau_{ср}$	с	1800	1800	1800	1800	1800	1800	0	0		
	$S_{пр}$	%	0,1	0,01	0,28	0,01	2,1	0,51	0,01	0,84		

5.7. Управляющие воздействия и регулируемые величины

Исследования, выполняемые на компьютерной модели процесса экстракции урана, позволяют уточнить результаты анализа исследуемой установки как объекта управления, а именно уточнить управляющие воздействия и регулируемые величины (разд. 2.3). Рассмотрим это на примере головной колонны установки «Утес» РХЗ СХК.

Управление в головной колонне необходимо реализовывать по концентрации урана, поскольку основная цель процесса – извлечение урана и плутония из растворов, и при этом содержание плутония в головной колонне существенно меньше, чем урана, и не измеряется в режиме реального времени. Концентрация урана в экстракте характеризует количество извлеченного урана, а концентрация в рафинате – остаток.

Анализ имитационной модели показывает, что наибольшее влияние на контролируемые переменные головной колонны оказывает расход ВФ4 и ОФ (разд. 5.5). Поток ОФ является оборотным реагентом, последовательно проходящим через все колонны, и задает производительность каскада, что делает практически невозможным изменение его расхода в целях управления головной колонной, так как изменение расхода в целях управления процессом экстракции в колонне нарушает нормальный ход технологических процессов в других колоннах каскада. Поэтому расход ОФ стабилизируется на заданном уровне. В результате чего изменение расхода ОФ для головной колонны является возмущением. Поток ВФ3 является промывочным раствором второй колонны (табл. 2.1), его расход не измеряется и зависит от работы контура стабилизации уровня ГРФ. На его величину можно влиять через расход ВФ5. Однако использование расхода ВФ5 в САУ головной колонной приведет к нарушению технологического процесса во второй колонне, а именно к ухудшению процесса промывания экстракта головной колонны. Кроме того, при управлении расходом ВФ3 через ВФ5 технологический объект управления будет обладать большим транспортным запаздыванием, что приведет к значительному ухудшению качества управления. Таким образом, изменение расхода ВФ3 является возмущением для головной колонны, причем практически не измеряемым. Поток ВФ2 в головной колонне нужен для рефлексирования плутония. В результате чего его использование в САУ в качестве управляющего воздействия не допустимо. Поток ВФ1 (в первом цикле экстракционной очистки) используется для дополнительной очистки экстракта от радиоактивных осколков, поэтому для САУ головной колонной по урану использовать его не целесообразно. Расход ВФ1 стабилизируется. Во втором цикле экстракционной очистки расходы ВФ1 и ВФ2 равны нулю.

Таким образом, в качестве управляющего воздействия для головной колонны (для 1-го и 2-го цикла экстракционной очистки) необходимо использовать расход ВФ4. Остальные входные координаты модели (5.20) становятся возмущениями.

5.7.1. Анализ возможности установки дополнительных датчиков в головной экстракционной колонне

В отличие от обычных химических процессов, где в ряде случаев допускается непосредственный контакт обслуживающего персонала с датчиками приборов и технологическим оборудованием, в радиохимических процессах непосредственный контакт персонала с технологическим оборудованием недопустим. Аппаратура управления и системы общеэнергетического контроля радиохимических процессов в основном подобны оборудованию управления и контроля, используемому в теплоэнергетике и химической промышленности. Однако радиохимические процессы выдвигают требования, связанные с дистанционностью монтажа и демонтажа, требования абсолютного отсутствия утечек из аппаратов и очень высокой надежности всех частей оборудования. Основные требования к первичным элементам датчиков, используемым в радиохимическом производстве, можно коротко сформулировать следующим образом [10]:

1. Устройство должно иметь малый объём, чтобы максимально уменьшить накопление в нем радиоактивных продуктов.
2. Оно должно быть выполнено так, чтобы радиоактивные жидкости не оставались в нем дольше периода, необходимого для выполнения определенных измерительных операций.
3. Должна быть обеспечена максимальная надежность и простота, даже если это идет в ущерб точности прибора.
4. Легкость монтажа и демонтажа.
5. Большая стойкость к высоким уровням радиации.
6. Элементы должны выдерживать внутреннее давление и быть герметичными. Поэтому в местах соединений коммутаций желательно использовать высококачественную сварку, например дуговую в среде инертного газа, электронно-лучевую, диффузионную и др.
7. Необходимо демпфировать приборы от влияния пульсаций насосов и пульсаторов.
8. Элементы должны противостоять коррозии от агрессивных растворов (кислота, щелочь и т. д.), используемых в процессе.
9. Наиболее желательны датчики и устройства, не имеющие движущихся частей и использующие бесконтактные методы контроля (без нарушения целостности аппаратов, трубопроводов и т. п.).

10. Должна быть предусмотрена возможность дистанционной проверки тарировки приборов и сигнализация исправности.

11. Герметичность всех выводов линий и сальников.

В решении задач непрерывного контроля технологических процессов радиохимического производства возможны два направления: пробоотбор с последующими анализами (химическими анализами) и непрерывный контроль при помощи приборов-датчиков, установленных непосредственно на рабочих аппаратах и коммуникациях. Пробоотбор необходим для градуировки датчиков и более тщательного анализа состояния технологического процесса по причине несовершенства датчиков или невозможности их установки и т. д.

Для контроля общепромышленных параметров технологических процессов: расхода, уровня, границы раздела фаз, плотности и температуры обычно применяют приборы общепромышленного назначения, выполненные с учетом вышеуказанных требований п. 1–7. Фактически используются специальные датчики, изготовленные или доработанные на специальных подразделениях (предприятиях) ядерно-топливного цикла.

Особое место и значение в радиохимическом производстве имеет проблема автоматического анализа состава производственных растворов. Наибольшее распространение получили методы определения концентраций бинарных смесей путем измерения плотности, электропроводности и других физических параметров. Для многокомпонентных смесей, с которыми обычно имеют дело в радиохимии, такое определение затрудняется тем, что любой из физических параметров не однозначно определяет наличие одного из веществ смеси. Исключение составляют те случаи, когда одно из веществ смеси имеет такое сильное влияние на физическое свойство, что влиянием остальных можно пренебречь. Например, в ряде случаев плотность раствора в основном определяется содержанием в нем урана и не зависит от содержания микроэлементов. Так как это условие не всегда выполняется, то в последние годы начал развиваться комбинированный метод анализа многокомпонентных растворов, основанный на измерении нескольких физических и химических параметров, характеризующих исследуемую смесь.

Среди чисто физических методов для анализа состава растворов хорошие результаты дают методы, использующие различного рода спектральные характеристики смеси, в частности оптические, массовые, радиоволновые спектры.

Масс-спектрометры могут полностью решить эту задачу, однако они очень сложны, громоздки и дороги.

Радиочастотная спектроскопия хорошо применяется для целей автоматического контроля состава технологических сред.

Анализ состава многокомпонентных смесей по спектрам поглощения видимого света, инфракрасного и ультрафиолетового излучений широко применяется в лабораторной практике и промышленности. Соответствующие приборы относительно просты, недороги и удобны в эксплуатации.

Для измерения умеренно высоких и высоких концентраций тяжелых элементов (урана, плутония) применяют фотоколориметры, гамма-абсорбциометры и нейтронные счетчики. Для определения содержания α - или γ -излучающих изотопов используют детекторы излучения. Определение низких концентраций и следов тяжелых элементов, продуктов деления и других ионных соединений в рабочих растворах осуществляется с помощью приборов, регистрирующих окислительный потенциал, электропроводность, а также с помощью полярографов и детекторов излучения.

В основу выбора технических средств измерения технологических параметров на установке «Утес» заложены следующие свойства измеряемых сред:

- проводимость растворов. Обычно проводимость водной и органической фаз отличаются на два, три порядка. Исключение составляют слои органики сильно насыщенные кислотой и металлом, а также межфазные образования;
- плотность растворов. Обычно разница в удельной плотности водной и органической фаз составляет $0,1 \div 0,3 \text{ г/см}^3$;
- возможность водной и органической фаз (как водородосодержащих сред) замедлять быстрые нейтроны до медленных (тепловых). Разница замедления между фазами незначительная (меньше 10 % в пользу водной фазы).
- свойства органической фазы и межфазных образований накапливать в себе продукты деления урана в большей степени, чем находящаяся в этой же цистерне водная фаза.

На основании этих свойств контролируемых сред, в основу создания и выбора средств контроля были заложены следующие принципы:

- изменение параметра короткозамкнутой на конце коаксиальной длинной линии, опущенной в цистерну, при изменении уровня проводящего раствора;
- изменение счета количества медленных нейтронов, при погружении в водородосодержащие среды счетчика медленных нейтронов с помещенным в нижнюю часть счетчика источником быстрых нейтронов;

- изменение выталкивающей силы на буюк, опущенный в раствор, в зависимости от глубины погружения;
- изменение частоты колебаний ультразвуковой системы при погружении чувствительных элементов системы в раствор;
- изменение величины сопротивления растекания контактного датчика, опущенного в раствор, в зависимости от вида раствора;
- расположение поплавка на поверхности жидкости.

На головной экстракционной колонне установки «Утес» установлены следующие датчики (разд. 2.2): буйковый измеритель плотности экстракта в верхней отстойной зоне (УБ-Э), нейтронный следящий уровнемер ЗДФВ (НСУ-1), буйковый уровнемер ЗДФН (УБ-Э), нейтронный индикатор отклонения уровня в пульс-камере (НИОУ-1), буйковый уровнемер ГРФ в нижней отстойной зоне (УБ-Э).

При работе во втором цикле экстракционной очистки имеется возможность установки дополнительного индикатора концентрации металла – показателя концентрации металла (ПКМ-1Д), устанавливаемого в свободной сухой трубе, проходящей через экстракционную зону.

Датчик ПКМ-1Д состоит из источника γ -излучения «Ирис» и приемника этого излучения – γ -камеры (КГ-11, СКМ-10). Излучение от γ -источника проходит через раствор металла, где частично поглощается. В результате чего, чем больше концентрация урана в области установки датчика, тем сильнее поглощается γ -излучение и меньше ток γ -камеры. Такой датчик является бесконтактным и позволяет заменить контактный способ измерения концентрации урана с помощью буйкового измерителя плотности. Установка ПКМ в нижней части головной колонны позволяет контролировать в режиме реального времени концентрацию урана в нижней части колонны (фактически концентрацию урана в раффинате), что затруднительно определить с помощью ЗДФН и ЗДФВ. Таким образом, наличие ПКМ в нижней части ЭК1, измерителя плотности экстракта в верхней отстойной зоне или использование дополнительного ПКМ вместо датчика плотности экстракта достаточно для построения системы автоматизированного управления (САУ), позволяющей достаточно точно управлять колонной.

Однако при работе в первом цикле экстракционной очистки установка ПКМ в нижней и средней части головной колонны невозможна, так как уровень γ -излучения превышает предельно допустимый для γ -камеры (КГ-11, СКМ-10). С другой стороны, отсутствие датчика концентрации металла или плотности жидкости в нижней части колонны (на спаде распределения концентрации урана по высоте колонны, где

плотность жидкости еще заметно зависит от концентрации урана) существенно усложняет построение САУ.

Установку буйкового измерителя плотности в экстракционной зоне колонны сложно выполнить по техническим причинам.

Следовательно, из рассмотренных выше методов остаются только те, на основе которых построены бесконтактные датчики, способные работать при высоком уровне γ -излучения и устанавливаемые внутри колонны. Здесь возможны следующие варианты [10]: ультразвуковой измеритель плотности, ультразвуковой измеритель плотности с комбинированным методом (с использованием нескольких частот), пьезометрический плотномер, нейтронный плотномер, рентгеновский плотномер и т. д.

Вопросы установки таких датчиков в экстракционной колонне требуют более подробного отдельного исследования.

Таким образом, при работе во втором цикле экстракционной очистки, если установлен ПКМ в нижней части колонны, то для построения САУ датчиков вполне достаточно. При работе в первом же цикле экстракционной очистки не хватает датчика плотности или концентрации металла (на спаде распределения урана по высоте колонны), но теоретическая возможность установки имеется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О федеральной целевой программе «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 годы и на перспективу до 2015 года»: Постановление Правительства РФ от 6.10.2006, № 605 // Гарант [Электронный ресурс]: Справочная правовая система. – Сетевая версия. – Электрон. дан. – М.: НПП «Гарант-Сервис», 1990–2007.
2. Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива: учеб. пособие для вузов. – М.: ЗАО «Атомэнергоиздат», 2006. – 576 с.
3. Столер А., Ридчарс Р. Переработка ядерного горючего / пер. с англ. А.П. Зефирова. – М.: Атомиздат, 1964. – 645 с.
4. Химия урана (Chemistry of Uranium) [Электронный ресурс]: Информация о ядерной энергии для электроснабжения / URANIUM INFORMATION Center Ltd. – Электрон. дан. – Melbourne, Australia, 2006. – Режим доступа: <http://www.uic.com.au/uicchem.htm>.
5. Ягодин Г.А., Каган С.З., Тарасов В.В. и др. Основы жидкостной экстракции. – М.: Химия, 1981.
6. Бекман И.Н. Ядерная индустрия: курс лекций. – М., 2005.
7. Землянухин В.И., Ильченко Е.И., Кондратьев А.Н., Лазарев Л.Н., Царенко А.Ф., Царицына Л.Г. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
8. Вдовенко В.М. Современная радиохимия. – М.: Атомиздат, 1969. – 544 с.
9. Карпачева С.М., Захаров Е.И. Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. – М.: Атомиздат, 1980. – 256 с.
10. Балашов А.А., Лоссиевский В.Л., Чернышев В.Н., Шваб А.Ф., Шелемин Б.В. Схемы и средства автоматизации радиохимических производств. – М.: Госатомиздат, 1963. – 187 с.
11. Разработка математической модели для расчета стационарных режимов экстракционных каскадов при переработке ОЯТ АЭС с использованием ТБФ-совместимых процессов / Е.А. Пузиков, Б.Я. Зильберман, Ю.С. Федоров, Е.Н. Мишин, О.В. Шмидт, Н.Д. Голецкий, Л.В. Сытник // Радиохимия. – Б. м. – 2004. – № 2. – С. 136–143.
12. Справочник по экстракции. В 3-х т. – Т. 1 / З.И. Николотова, Н.А. Карташова. Экстракция нейтральными органическими соединениями. – М.: Атомиздат, 1976. – 600 с.
13. Кац Д., Рабинович Е. Химия урана. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954.
14. Комплекс технических средств «МИКОН». Комплекс программного обеспечения «МИКСИС» [Электронный ресурс]: Техническое описание / ЗАО «ИНКОММЕТ». – Электрон. дан. – М., 2006. – Режим доступа: <http://www.inkommet.ru>.

15. Емельянов А.И., Емельянов В.А. Исполнительные устройства промышленных регуляторов. – М.: Машиностроение, 1975.
16. Слободкин М.С. и др. Исполнительные устройства регуляторов. – М.: Недра, 1972.
17. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.
18. Справочник проектировщика АСУТП / Г.Л. Смилянский, Л.З. Амлинский. – М.: Машиностроение, 1983.
19. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.
20. Цибровский Я. Процессы химической технологии / под ред. П.Г. Романкова. – Л.: Госхимиздат, 1958.
21. Багров В.Г., Белов В.В., Задорожный В.Н., Трифонов А.Ю. Методы математической физики. Специальные функции. Уравнения математической физики. – 2-е изд., испр. и доп. – Томск, 1999. – 771 с.
22. Луценко В.А., Финякин Л.Н. Аналоговые вычислительные машины в химической технологии. – М.: Химия, 1979.
23. Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных. – М., 1976.
24. Ракин Л.В. Введение в теорию уравнений математической физики. – СПб., 1999.
25. Уравнения математической физики [Электронный ресурс]: Параболические и гиперболические уравнения. – СПб.: ПМ-ПУ, 2006. – Режим доступа: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/education/courses/common/umf.html>.
26. Уилсон, Армстронг. Динамические характеристики промышленных объектов регулирования / под ред. В.М. Рущинского. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
27. Фрэнкс Р. Математическое моделирование в химической технологии. – М.: Химия, 1971.
28. Шински Ф. Системы автоматического регулирования химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1974.
29. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов. – М.: Химия, 1971. – 272 с.
30. Броунштейн Б.И., Щеголев В.В. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах. – Л.: Химия, 1988. – 336 с.
31. Протодьяконов И.О., Люблинская И.Е., Рожков А.Е. Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость–твердое тело. – Л.: Химия, 1987. – 336 с.
32. Дьяков В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
33. Дьяков В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

34. Гультяев А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие. – СПб.: КОРОНА-Принт, 1999. – 288 с.
35. Потёмкин В.Г. Система инженерных и научных расчётов MFTLAB 5.x. – В 2-х т. – Том. 1. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 366 с.
36. Потёмкин В.Г. Система инженерных и научных расчётов MFTLAB 5.x. – В 2-х т. – Том. 2. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 366 с.
37. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
38. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. – Киев: «Вища школа», 1976. – 183 с.
39. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
40. Реймаров Г.А. Первичная переработка информации в АСУ ТП: учебно-методическое пособие. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1980. – 95 с.
41. Ясельский В.К., Кузнецов А.И., Дядик В.Ф. Обработка результатов измерений. – Томск: Изд. ТПУ, 1977.
42. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977.
43. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
44. Трофимов А.И., Егупов Н.Д., Дмитриев А.Н. Методы теории автоматического управления, ориентированные на применение ЭВМ. Линейные стационарные и нестационарные модели: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 656 с.
45. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ, 2004. – 911 с.
46. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977.
47. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник. В 3-х т. – Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.
48. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

Учебное издание

ГОРЮНОВ Алексей Германович
ЛИВЕНЦОВ Сергей Николаевич
ЛЫСЕНКО Андрей Алексеевич
ЧУРСИН Юрий Александрович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ УРАНА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

Научный редактор
доктор физико-математических наук,
профессор

А.А. Орлов

Редактор

М.В. Пересторонина

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 15.12.2008. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 8,32. Уч.-изд. л. 7,5.

Заказ 821. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.