



СХК
РОСАТОМ

Обзор ядерных аварий с возникновением СЦР. Уроки аварий

Чередов Вячеслав Михайлович
Инженер-технолог (по ЯБ), ведущий ОЯБ АО «СХК»

Самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция деления



Самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция деления – это процесс деления ядер нуклидов, при котором число нейтронов, образующихся в процессе деления ядер за какой-либо интервал времени, равно или больше числа нейтронов, убывающих из системы вследствие утечки и поглощения за этот же интервал времени.

Эффективный коэффициент размножения

Коэффициент размножения - отношение полного числа нейтронов, образующихся в системе в рассматриваемом интервале времени за счет деления ядер, к числу нейтронов, выбывающих из этой системы в результате поглощения и утечки за этот же интервал времени.

$$K_{эф} = \frac{N'}{N} = \frac{\text{Рождение}}{\text{Поглощение} + \text{Утечка}}$$

$K_{эф} = 1$, то говорят, что система находится в критическом состоянии;

$K_{эф} > 1$, система надкритическая, развивается неуправляемая СЦР;

$K_{эф} < 1$, система подкритическая, СЦР не возможна.

Критическое состояние среды – это результат баланса между рождёнными и исчезнувшими нейтронами.

Факторы, влияющие на критичность системы



Кэф – функция целого ряда факторов, влияющих на критичность, которые можно классифицировать на два направления:

- **факторы, связанные со свойствами системы;**
 - Обогащение;
 - Состав системы (активной зоны);
 - Замедление;
 - Поглощение.
- **факторы, влияющие на утечку нейтронов из системы.**
 - Влияние отражателя;
 - Геометрические факторы;
 - Температура.

Общие сведения



- **СЦР** относится к числу наиболее опасных аварий по сумме потенциальных последствий: внешнему и внутреннему облучению персонала и населения, загрязнению окружающей среды, значительному материальному и моральному ущербу, т. к. в процессе ее образуются радиоактивные продукты деления (часть из них в виде газов и аэрозолей), мгновенные нейтроны и гамма-кванты деления, а также может возникнуть давление, приводящее к разрушению аппарата. Особенно опасным может быть СЦР в производствах, связанных с переработкой, хранением, транспортировкой отработавшего топлива, содержащего большое количество высокоактивных нуклидов, образовавшихся в процессе работы реактора. В этих случаях возможен выход в окружающую среду нуклидов с большой активностью.

Общие сведения



При анализе СЦР наиболее важные параметры – это энерговыделение (число делений) и длительность процесса. По числу делений определяют дозу облучения и выход продуктов деления, по скорости развития реакции – тепловое и механическое воздействие.

Наибольшее влияние на кинетику протекания СЦР оказывают скорость ввода реактивности ($\rho = K_{эф} - 1/K_{эф}$), механизм самогашения, начальный фон нейтронов, время их жизни в системе.

Механизм самогашения – это свойство системы уменьшать свою реактивность.

Типичный механизм гашения для растворов – это образование радиолитического газа, когда в процессе деления ядра осколки деления образуют в воде микрообъемы высокой температуры и давления, заполненные продуктами радиолиза воды, что приводит к уменьшению плотности системы и, как следствие, к увеличению утечки нейтронов, падению реактивности, спаду мощности. Следующие по времени протекания СЦР механизмы гашения – это кипение, т.е. образование пузырьков пара, далее эффект Доплера, т.е. увеличение сечения поглощения ^{238}U при увеличении температуры, и испарение раствора.

Общие сведения

Как правило, СЦР в растворных системах происходит следующим образом. Первый пик мощности, в общем случае лежит в интервале $5 \cdot 10^{16} \div 5 \cdot 10^{17}$ делений и заканчивается благодаря образованию пузырьков радиолитического газа до температуры кипения растворов. СЦР в растворах могут протекать от одной миллисекунды до десятков часов, в процессе которых происходит энерговыделение от 10^{14} до 10^{20} делений.



Протекание типичной аварии в системе с растворами

Общие сведения



СЦР условно можно разделить на минимальную, наиболее вероятную, и максимальную СЦР по энерговыделению.

Минимальной является такая СЦР, которая ограничивается действием естественного механизма гашения. В системах с растворами урана энерговыделение за минимальную СЦР составляет 10^{15} дел, с растворами плутония 10^{14} дел.

За наиболее вероятную принимают СЦР с энерговыделением 10^{18} дел. Это значение является средним по результатам обработки нескольких десятков аварий и экспериментов, имитирующих аварии на специальных стендах.

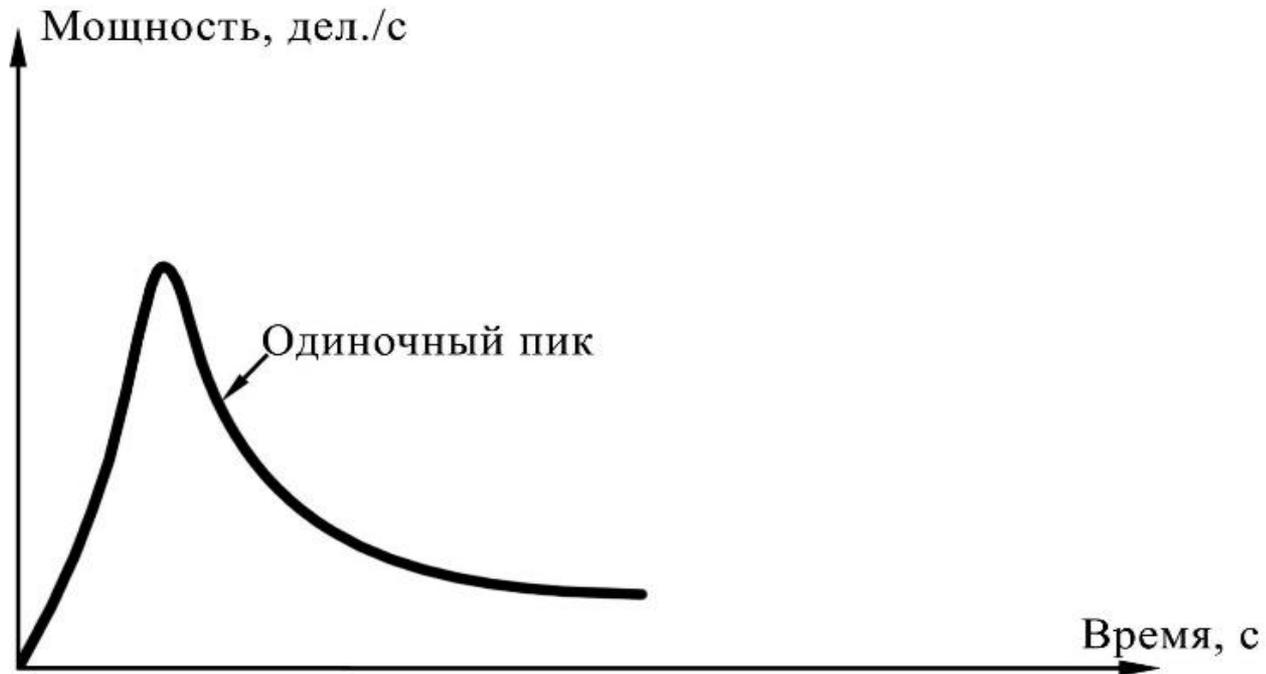
В качестве максимальной рассматривается СЦР с энерговыделением 10^{20} дел.

Общие сведения

Энерговыделения, необходимые для протекания теплофизических процессов

Процесс	Необходимое число делений
Образование 1 л радиолитического газа	$7,5 \cdot 10^{15}$
Нагревание 100 л воды от 20 до 100°C	10^{18}
Испарение 100 л воды	$7 \cdot 10^{18}$
Нагревание 1 кг урана до $T_{пл} = 1133^\circ\text{C}$	$6,6 \cdot 10^{15}$
Плавление 1 кг урана	$2,6 \cdot 10^{15}$

Общие сведения



Протекание типичной аварии с металлической системой

Ядерно-опасный участок. Ядерно-опасная зона

Ядерно-опасный участок – подразделение ОЯТЦ (цех, участок, отделение, отдел, лаборатория, хранилище) или производственное помещение, в котором осуществляется любое обращение с ЯДМ (В,Н) – плутонием, ураном-233, ураном, обогащение которого нуклидом уран-235 выше 1% (масс.), если суммарная масса плутония и нуклидов уран-233, уран-235, находящихся в любой момент времени в данном подразделении, превышает 300 г. Ядерно-опасный участок включает все производственные помещения подразделения и отдельные здания подразделения, в которых находятся или могут находиться ЯДМ (В,Н).

Ядерно-опасная зона – производственная площадь с ЯДМ (В), в пределах которой поглощенная доза мгновенного смешанного нейтронного и гамма- излучения от СЦР с числом делений 10^{18} может быть более 0,1 Гр

Система аварийной сигнализации - совокупность технических средств, предназначенная для обнаружения СЦР и для выдачи аварийных сигналов о необходимости эвакуации работников из ядерно-опасной зоны.

Минимально необходимый состав технических средств САС СЦР:

- а) блок детектирования СЦР;
- б) устройства звуковой и световой сигнализации;
- в) промежуточные преобразователи;
- г) линии связи БД СЦР и устройств звуковой и световой сигнализации с промежуточными преобразователями.

блок детектирования самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления – техническое средство САС СЦР, предназначенное для обнаружения СЦР, содержащее измерительный канал мощности поглощенной дозы и поглощенной дозы мгновенного нейтронного и (или) гамма-излучения от СЦР, формирующий по результатам измерения дискретный логический сигнал о превышении установленного порога срабатывания, который используется для включения аварийных звуковых и световых сигналов.

устройства звуковой и световой сигнализации – технические средства САС СЦР, выполняющие функции оповещения работников о возникновении СЦР, сигнальной поддержки процесса их немедленной эвакуации из ЯОЗ и ограничения доступа в ЯОЗ.

Аварийные ситуации.



1. Внешние события:

- сейсмические и другие явления, процессы и факторы природного и техногенного происхождения, свойственные данному региону (наводнения, ураганы, взрывы и др.);
- прекращение подачи электроэнергии (обесточивание ОЯТЦ).

2. Внутренние события:

- падение грузов при транспортировании ЯДМ (В) внутри ОЯТЦ;
- пожар внутри помещений;
- разрыв трубопроводов, повреждение калориферов и т.п.;
- аварии, приводящие к затоплению помещения водой из-за разрывов сосудов, трубопроводов и др.;
- прекращение подачи сжатого воздуха, нарушение герметичности;
- взрывы, обусловленные химическими реакциями;
- нарушения состава инертной среды;
- обесточивание отдельных ЯОУ.

Аварийные ситуации.



3. Коррозия элементов оборудования, приводящая к утончению стенок трубопроводов и оборудования, образованию сквозных отверстий, утечке растворов, уменьшению поглощающей способности гетерогенных поглотителей нейтронов, отказу крепежных элементов и т.п., провоцирующая превращение оборудования (емкостей и аппаратов) типа Б в оборудование (емкости и аппараты) типа О.
4. Попадание растворов ЯДМ (В) в опасное оборудование (аппараты и емкости), в котором по условиям технологического процесса их не должно быть.
5. Разрушение стеллажей, подвесок, оборудования, нарушение герметичности отдельной упаковки с ЯДМ (В), нарушение порядка размещения упаковок, повреждение твэлов, ТВС, поглощающих элементов, изменение геометрических формы и размеров оборудования.
6. Изменение агрегатного состояния, других свойств ЯДМ (В) вследствие непредусмотренной подачи реагентов, сорбции, экстракции, осаждения.
7. Увеличение концентрации ЯДМ (Н) до значений, превышающих безопасную концентрацию, из-за непредусмотренного попадания экстрагента, сорбента в оборудование (емкости и аппараты).
8. Переход ЯДМ (В) из жидкого состояния в твердое (осаждение, кристаллизация).

Аварийные ситуации.



3. Коррозия элементов оборудования, приводящая к утончению стенок трубопроводов и оборудования, образованию сквозных отверстий, утечке растворов, уменьшению поглощающей способности гетерогенных поглотителей нейтронов, отказу крепежных элементов и т.п., провоцирующая превращение оборудования (емкостей и аппаратов) типа Б в оборудование (емкости и аппараты) типа О.
4. Попадание растворов ЯДМ (В) в опасное оборудование (аппараты и емкости), в котором по условиям технологического процесса их не должно быть.
5. Разрушение стеллажей, подвесок, оборудования, нарушение герметичности отдельной упаковки с ЯДМ (В), нарушение порядка размещения упаковок, повреждение твэлов, ТВС, поглощающих элементов, изменение геометрических формы и размеров оборудования.
6. Изменение агрегатного состояния, других свойств ЯДМ (В) вследствие непредусмотренной подачи реагентов, сорбции, экстракции, осаждения.
7. Увеличение концентрации ЯДМ (Н) до значений, превышающих безопасную концентрацию, из-за непредусмотренного попадания экстрагента, сорбента в оборудование (емкости и аппараты).
8. Переход ЯДМ (В) из жидкого состояния в твердое (осаждение, кристаллизация).

Аварийные ситуации.



9. Увеличение массовой влажности материала за счет непредусмотренного попадания пара, влаги в оборудование или в упаковку с ЯДМ (В) и, как следствие, увеличение замедляющей способности оборудования и(или) упаковки.

10. Ошибки работников при ведении технологического процесса и нарушения технологического регламента:

- неправильное выполнение схемы обвязки оборудования при пусконаладочных и(или) ремонтных работах;
- повторная загрузка ЯДМ (В) в оборудование типа О;
- несоблюдение установленного интервала времени между загрузками;
- ошибочная загрузка ЯДМ (В) не по назначению (в другое оборудование, другие материалы и т.п.);
- ошибочная коммутация вентиляей;
- ошибка при отборе пробы;
- ошибки в процессе выполнения измерений и анализа пробы;
- нарушение установленной проектом периодичности зачистки, промывки и замены оборудования.

Аварийные ситуации.



11. Изменение температуры реагентов, замедлителей нейтронов, ЯДМ (В) (вследствие пожара, выхода из строя калориферов, нагревателей, холодильников и т.п.), приводящее к изменению геометрических размеров оборудования, тепловым ударам, конденсации, кипению, замораживанию, испарению реагентов, ЯДМ (В), замедлителей нейтронов, поглотителей нейтронов и т.п.

12. Увеличение эффективности замедления нейтронов в оборудовании, содержащем ЯДМ (В), уменьшение поглощающих свойств поглотителей нейтронов.

13. Изменение плотности, пространственного распределения и нуклидного состава ЯДМ (В).

14. Переполнение оборудования (емкости, аппарата), содержащего раствор ЯДМ (В).

Обзор ядерных аварий

Страна	Число аварий	Число жертв	Год
Россия (СССР)	13	10	1953-1997
США	7	7	1845-1978
Великобритания	1	-	1970
Япония	1	2	1999
Всего	22	21	



Хронология промышленных ядерных аварий.

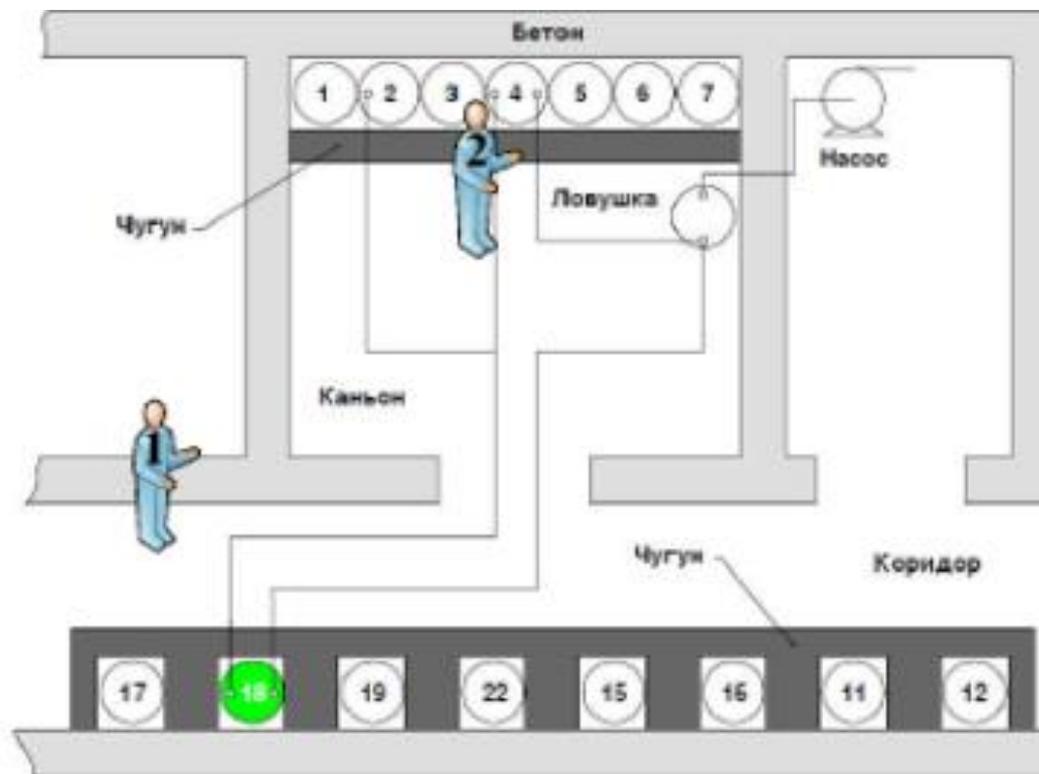
ПО «Маяк», г. Озерск, март 1953 г.



СХК
РОСАТОМ

Технологическая схема состояла из 15 цилиндрических ядерно-опасных емкостей (сборников растворов) объемом 40 литров каждый. Ядерная безопасность обеспечивалась организационно:

- ограничением массы плутония в каждой емкости – норма загрузки 500 граммов Pu;
- с целью снижения нейтронного взаимодействия между сборниками запрещался прием растворов в емкости № 2, 4, 6.



ПО «Маяк», г. Озерск, март 1953 г.



СХК
РОСАТОМ

На рисунке приведены сведения о количестве растворов и содержании плутония в емкостях на начало операции согласно записям в оперативном журнале.

Надо обратить внимание на то, что уже были нарушены введенные для этого участка ограничения по ядерной безопасности:

- в емкостях 2 и 4 находился раствор плутония, которого в этих сборниках не должно быть;
- в емкостях 1, 3, 4 превышена установленная норма загрузки.



Содержание плутония в емкостях 1-7 по данным оперативного учета

ПО «Маяк», г. Озерск, март 1953 г.



СХК
РОСАТОМ

По данным оперативного учета емкость № 18 считалась освобожденной от раствора!

Основываясь на данных оперативного учета и предположении, что **емкость № 18 пуста**, следовало ожидать, что параметры раствора, после его приема в сборник №18, окажутся такими, как показано на рисунке.



Ожидаемые значения содержимого емкости №18 после приема растворов



В воскресенье 15 марта 1953 года было необходимо принять продукцию от двух операций растворения облученных блоков и аффинажа плутония.

❑ После окончания операции передачи первый оператор:

- отсоединил вакуумный шланг от штуцера контейнера № 18, увидел бурное выделение газа (пену),
- почувствовал (ощутил) руками, что температура раствора в контейнере значительно повысилась по сравнению с комнатной температурой.

❑ Оператор в каньоне заметил появление раствора в стеклянной ловушке.

❑ Операторы решили передать раствор из контейнера № 18 обратно в контейнер № 4:

- Раствор из контейнера № 18 был возвращен в контейнер № 4 и разбавлен водой и азотной кислотой для его охлаждения.
- Затем операторы разделили раствор из контейнера № 4 в контейнеры № 22 и № 12, стоящие в коридоре.

Выброс части раствора в ловушку во время вспышки объясняет, почему не произошло второй вспышки во время передачи.

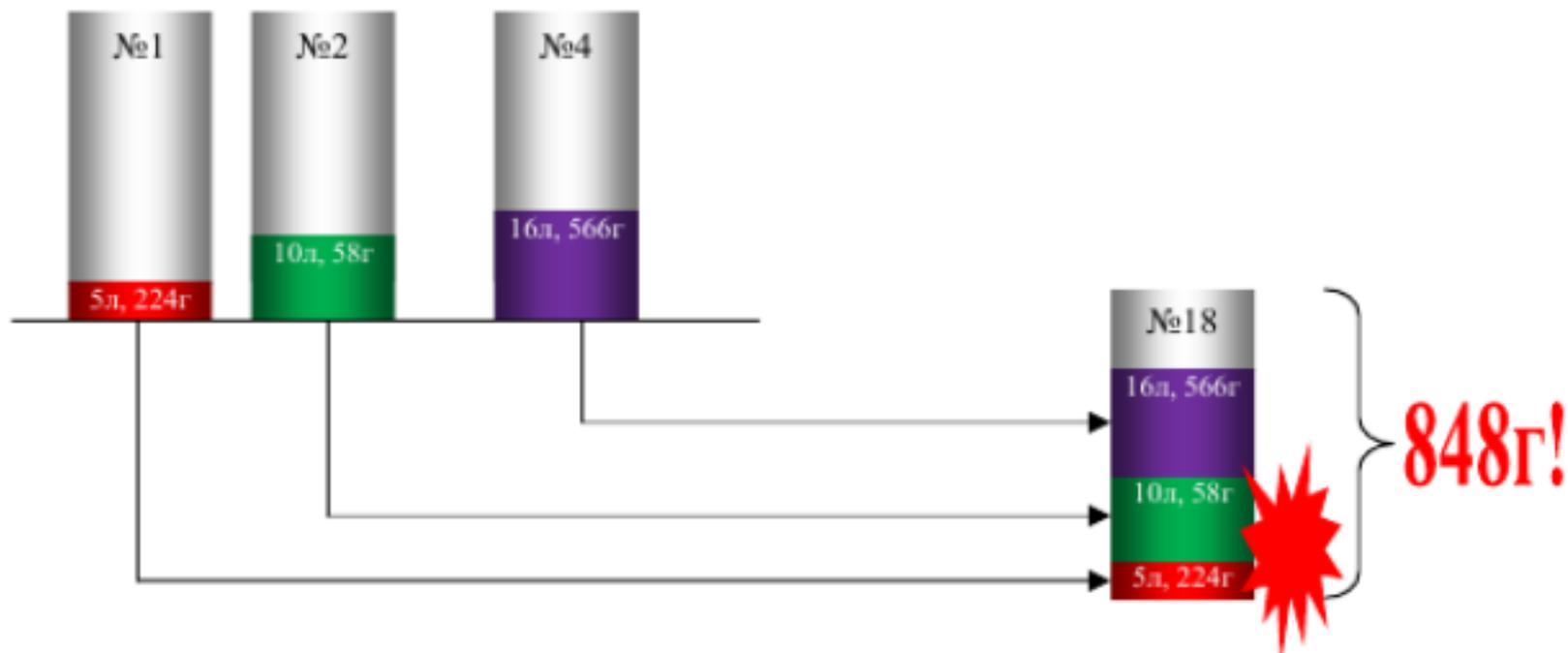
ПО «Маяк», г. Озерск, март 1953 г.



СХК
РОСАТОМ

Реальное содержимое контейнера № 18 во время аварии

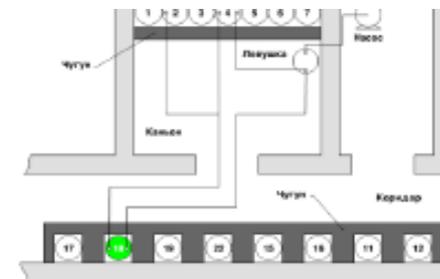
Номер контейнера, из которого передан раствор в контейнер 18	Объем раствора, л	Масса плутония, г	Концентрация Pu, г/л
1	5,0	224,0	44,8
2	10,0	58,0	5,8
4	16,0	566,0	35,4
Всего	31,0	848,0	27,4





Результаты расследования

- Одной из причин аварии была **неуценная передача** 5 литров раствора из контейнера № 1 в контейнер № 18.
- Расследование аварии **не выявило**, кто и когда сделал передачу;
- Оценка полного числа делений дает результат около 2×10^{17} делений.
- Оператор, стоявший около контейнера № 18, получил дозу до 1000 рад ($\cong 10$ грей), перенес тяжелую форму лучевой болезни и ампутацию ног, но остался жив и умер через ~ 35 лет после аварии.
- Второй оператор был облучен дозой ~ 100 рад ($\cong 1$ грей).
- Физических повреждений оборудования не было.
- Требования регламента до аварии однозначно предписывали **не принимать** растворы в контейнеры 2, 4, 6. Присутствие растворов в контейнерах 2, 4 в начале смены перед аварией показывает, что это **требование нарушалось**.
- Данные оперативного учета (таблица 1) показывают, что и **норма загрузки** (500 граммов) также **нарушалась**.



ПО «Маяк», г. Озерск, апрель 1957 г.

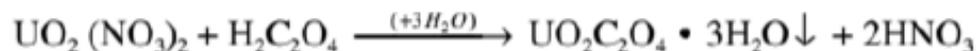


Авария произошла в одной из комнат большого производственного здания, где проводились различные операции с высокообогащенным ураном.

- Источник ЯДМ: накопление осадка с высокообогащенным (90%) ураном в монжусе камеры осаждения оксалата (опасной геометрии);
- Пострадавшие: один летальный исход, пятеро серьезно облученных.
 - В комнате находилось несколько камер на расстоянии до двух метров друг от друга.
 - Операции проводились в типичном режиме в 4-х 6-ти часовых смен.
 - В помещении **не было** приборов непрерывного контроля радиационной обстановки и **гамма-фон замерялся периодически**.

Описание процесса

- азотнокислые растворы уранила с примесями вместе с щавелевой кислотой поступали в реактор, оснащенный механической мешалкой и внешней пароводяной рубашкой.
- Поступающий раствор обычно имел концентрацию 15-20 г/л.
- Образование **тригидрата оксалата уранила** происходило по реакции



- Суспензия оксалата уранила при помощи вакуума передавалась в передаточную емкость, а из нее самотеком стекала в нутч-фильтр.
- Урансодержащий осадок накапливался на фильтровальном полотне;
- Фильтрат вакуумом отсасывался через фильтр и поступал в монжюс – горизонтальный цилиндрический сосуд диаметром 450 мм и длиной 650 мм с объемом около 100 литров.

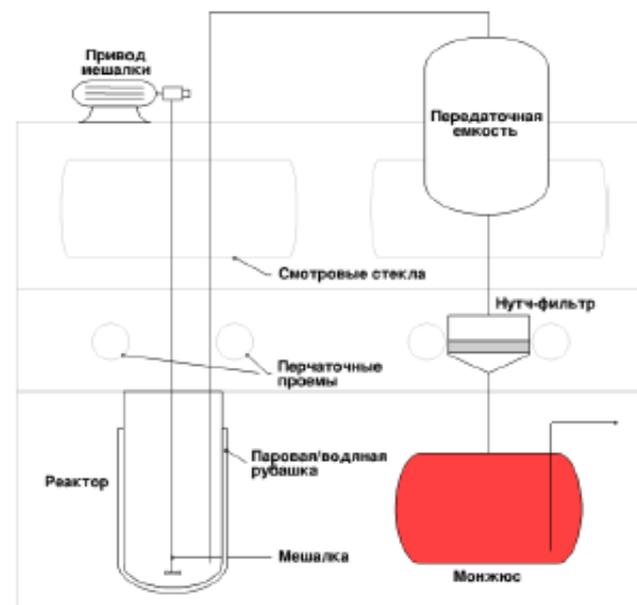


Схема расположения оборудования для поступления растворов уранила, оксалатного осаждения и процесса фильтрации.

ПО «Маяк», г. Озерск, апрель 1957



- **Нормы загрузки, обеспечивающие ядерную безопасность, содержались в инструкциях по эксплуатации и памятках, прикрепленных к каждой из камер.**

ОДНАКО

- **Оборудование камер проектировалось и устанавливалось на основе эксплуатационных соображений, поэтому многие элементы оборудования не имели безопасную, с точки зрения критичности, геометрию.**
- **Основным средством обеспечения безопасности в камере было ограничение массы делящего материала в партии. Норма загрузки не превышала 800 граммов.**
- **Масса делящегося материала определялась по известным объему и концентрации нитрата уранила.**
- **С целью минимизации облучения персонала в ходе периодических зачисток передаточной емкости и монжюса, требующих вскрытия, решили, что простой промывки будет достаточно.**

ПО «Маяк», г. Озерск, апрель 1957



СХК
РОСАТОМ

Несмотря на выполнение оператором имеющихся правил и соблюдение установленных параметров, имелись факторы повлиявшие на **накопление урана** в монжюсе в количестве, **намного превышающем** разрешенное:

- Температура осаждающегося раствора. Не было прибора точного контроля температуры (напр., термopара). Пропускаемый через нутч-фильтр раствор, содержащий осадок, мог иметь повышенную температуру или кислотность, а следовательно, и большую концентрацию нитрата уранила, чем ожидалось.
- Небольшие визуально незаметные дефекты фильтровального полотна. Согласно регламенту, фильтровальное полотно необходимо было заменять, когда возникали **видимые** дефекты или скорость фильтрования превышала норму.
- Измерения массы входящего и выходящего из камеры ДЯМ. Если разница превышала 5%, требовалось зачистить баки. Инструкции предусматривали определенный график зачистки баков, однако специально не оговаривалось, сколько можно пропустить партий, если порог в 5% не превышался. К тому же **не отслеживалось накопление** делящихся материалов в оборудовании между зачистками.



Итак 21 апреля

- Проводилась обычная операция по вакуумному фильтрованию суспензии оксалата уранила.
- Через смотровое окно камеры аппаратчица увидела
 - вспучивание фильтровального полотна,
 - бурное газовыделение и выброс части осадка с фильтра на столешницу камеры.
- Аппаратчица (инстинктивно) **вручную собрала выпавший осадок урана** обратно на фильтр и приступила к отмывке (уборке) столешницы камеры.
- Вскоре она почувствовала ухудшение своего состояния.
- Эффект газовыделения в осадке продолжался около 10 минут и прекратился из-за выброса раствора из монжюса в вакуумную ловушку, установленную в соседней камере.

ПО «Маяк», г. Озерск, апрель 1957



СХК
РОСАТОМ

Результаты расследования

- Поглощенная доза на все тело аппаратчицы составила около 3000 рад. Она скончалась через 12 дней после аварии.
- Во время аварии в помещении на разных расстояниях от монжюса находились 5 человек. Они получили дозы свыше 300 рад, перенесли лучевую болезнь, но выздоровели.
- **Масса отложений в монжюсе составила 3,06 кг по U-235 в двух формах:**
 - толстой корки — результат длительного накопления
 - осадка, плотность которого уменьшалась с высотой.
- Механических повреждений резервуара не было и помещение не было загрязнено – камера сохранила герметичность.
- Работа возобновилась через несколько дней.
- На камере был установлен прибор контроля радиационной обстановки, пересмотрены технологические инструкции, проведено обучение персонала.
- Принято решение о проведении критических экспериментов для определения критических параметров сосудов, используемых в техпроцессе.

ПО «Маяк», г. Озерск, январь 1958



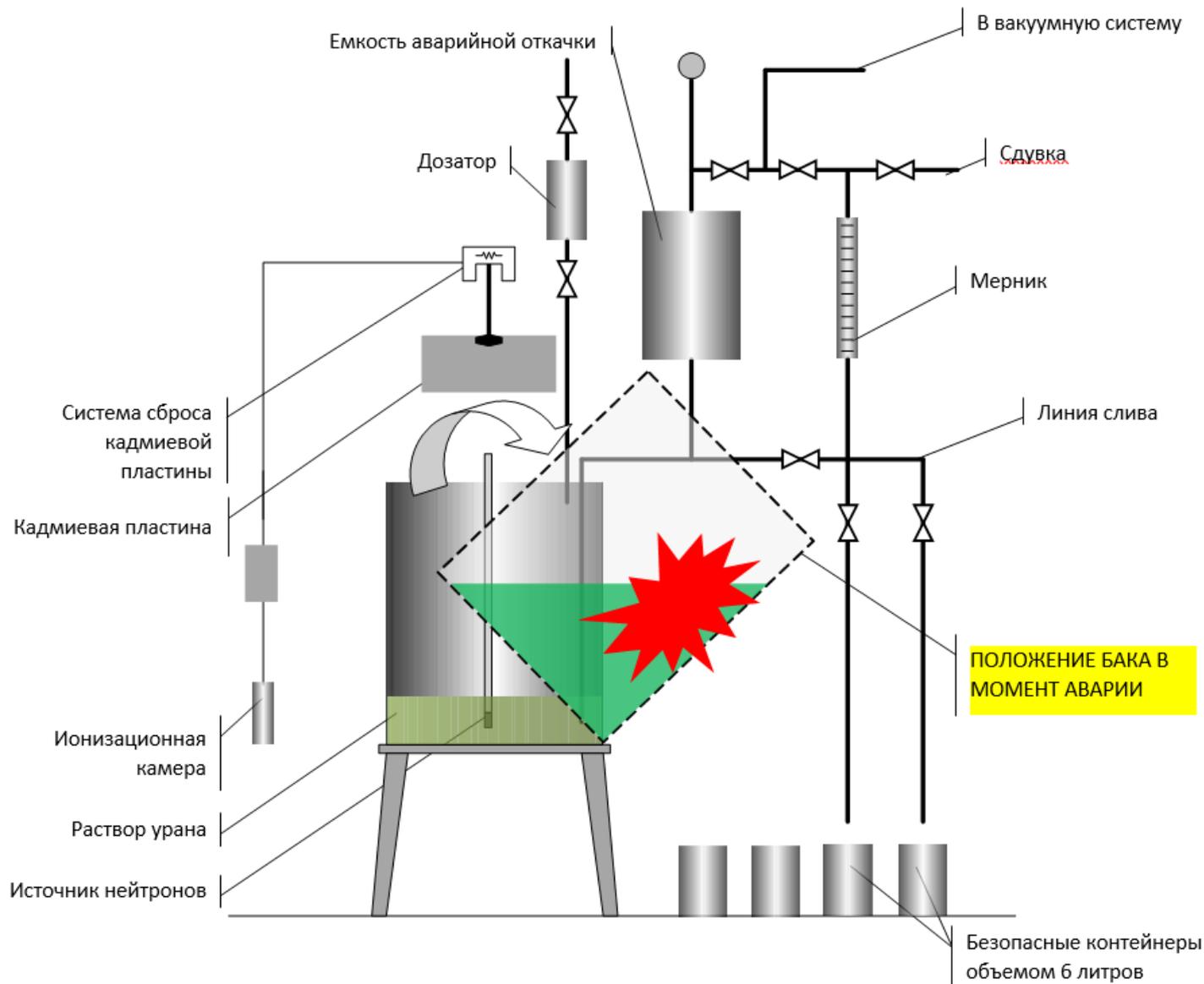
СХК
РОСАТОМ

- Этот был первый эксперимент с т.н. «большим» баком – стальным цилиндром с внутренним диаметром 75 см толщиной стенок 2-4 мм.
- Бак размещался на расстоянии 80 см от бетонного пола на стальной подставке толщиной 8 мм и **не имел** существенных отражателей.
- Вместимость бака – более 400 литров
- Центральная труба содержала нейтронный источник
- Поток нейтронов регистрировался расположенными снаружи бака счетчиками, наполненными газом BF_3 .
- В измерениях коэффициента размножения нейтронов применялась стандартная методика обратного умножения
- Эксперимент был закончен, когда в бак было залито **64,4** литра раствора уранилнитрата с концентрацией урана **376 г/л**.
- По окончании каждого эксперимента, согласно регламенту, требовалось сливать раствор в безопасные емкости.
- **Часть раствора из бака была слита штатным образом.**
- Начальник смены :
 - был уверен, что бак находится в глубоко подкритическом состоянии
 - решил ускорить утомительный процесс перелива и вручную слить оставшийся раствор.
- Для этого пришлось
 - **извлечь нейтронный источник**
 - **снять направляющую трубу**
 - **отсоединить бак от подставки.**
- Трое экспериментаторов руками подняли бак и начали наклонять его для слива раствора.
- **В это время произошел всплеск мощности.**

ПО «Маяк», г. Озерск, январь 1958



СХК
РОСАТОМ



ПО «Маяк», г. Озерск, январь 1958



СХК
РОСАТОМ

Экспериментаторы:

- Ощутили **вспышку**
- увидели **выброс раствора из бака** до потолка помещения высотой 4 м.
- **Трое** экспериментаторов **бросили бак** и вместе с четвертым участником экспериментов, находившимся в 2,5 м от бака, немедленно отправились в раздевалку, приняли душ и были отправлены в больницу.

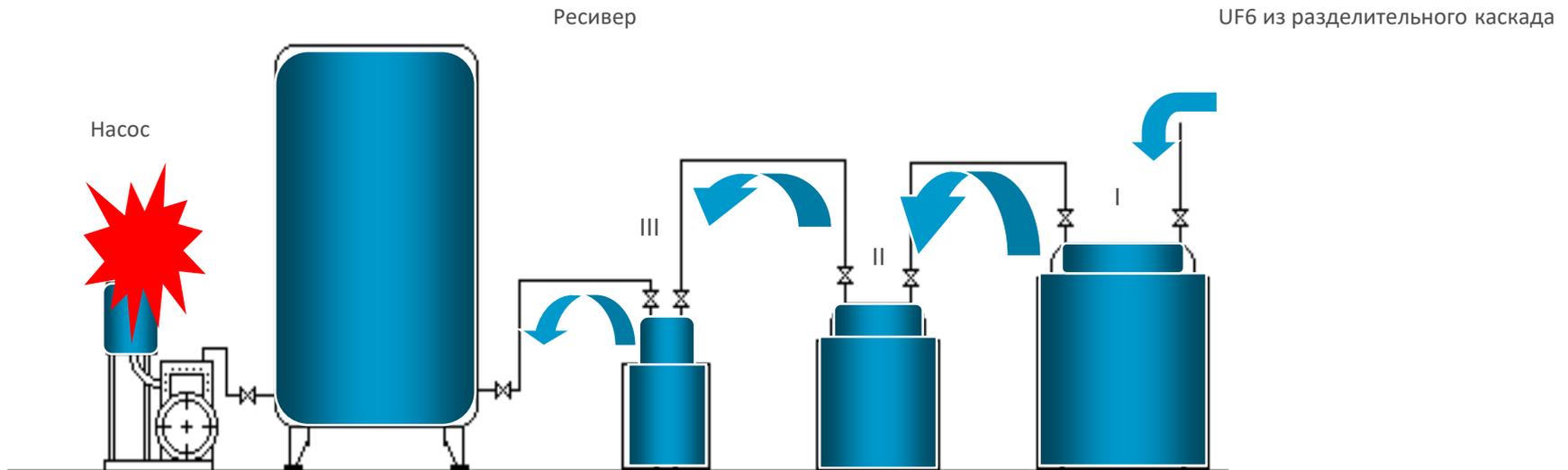
Результаты расследования

- **Раствор был намного ближе к критическому состоянию**, чем предполагали экспериментаторы.
- **Тела троих экспериментаторов послужили дополнительными отражателями**
- Произошло **изменение геометрии раствора** в баке вследствие его наклона
- Система перешла в критическое состояние на мгновенных нейтронах.
- Слабый нейтронный фон (~ 100 нейтр/сек) также повлиял на запаздывание начала цепной реакции и, таким образом, повысил энергетику всплеска мощности.
- **Поглощенная доза смешанного нейтронного и гамма-излучений для каждого сотрудника, находившегося вплотную к баку, составила 6000 рад**, все трое скончались через 5-6 дней после аварии.
- **Сотрудница**, находившаяся на расстоянии 2,5 м от места происшествия, получила дозу около **600 рад**, перенесла острую лучевую болезнь с потерей в последующий период зрения из-за катаракты обоих глаз.

СХК г. Северск, июль 1961 г.

СЦР произошла в баке вакуумного насоса ВН-6 в результате накопления в нем урана.

Насос работал в схеме продвижения гексафторида урана (ГФУ) по коллекторам, системе емкостей ("I", "II", "III") и ресиверов на участке очистки гексафторида урана от "легких" примесей (воздух, фтористый водород). Упрощенный тех. процесс заключался в следующем:



СХК г. Северск, июль 1961 г.



14 июля 1961 года в 7 часов 30 минут в расширительном баке насоса ВН-6 произошла СЦР.

Параметры аварийной системы:

Объем масла в баке, л 50;
Масса U^{235} в масле, г 2000;
Содержание U^{235} , % (масс) 22,6.

СЦР имела кратковременный характер, гасилась за счет температурных эффектов и частичного выброса масла из бака в полость насоса. Находившийся на расстоянии 0.5м от насоса оператор получил острую дозу внешнего облучения около 200 рад.

Причины аварии и ее последствий:

- дефицит жидкого азота;
- повышенное поступление легких примесей в технологическую схему.
- отключение приборов, регистрирующих температуру основных емкостей;
- вывод из нормального технологического процесса промежуточных емкостей - не охлаждались;
- нарушение операторами периодичности и процедуры заливки жидкого азота³⁶ в криостаты.

СХК г. Северск, январь 1963 г.

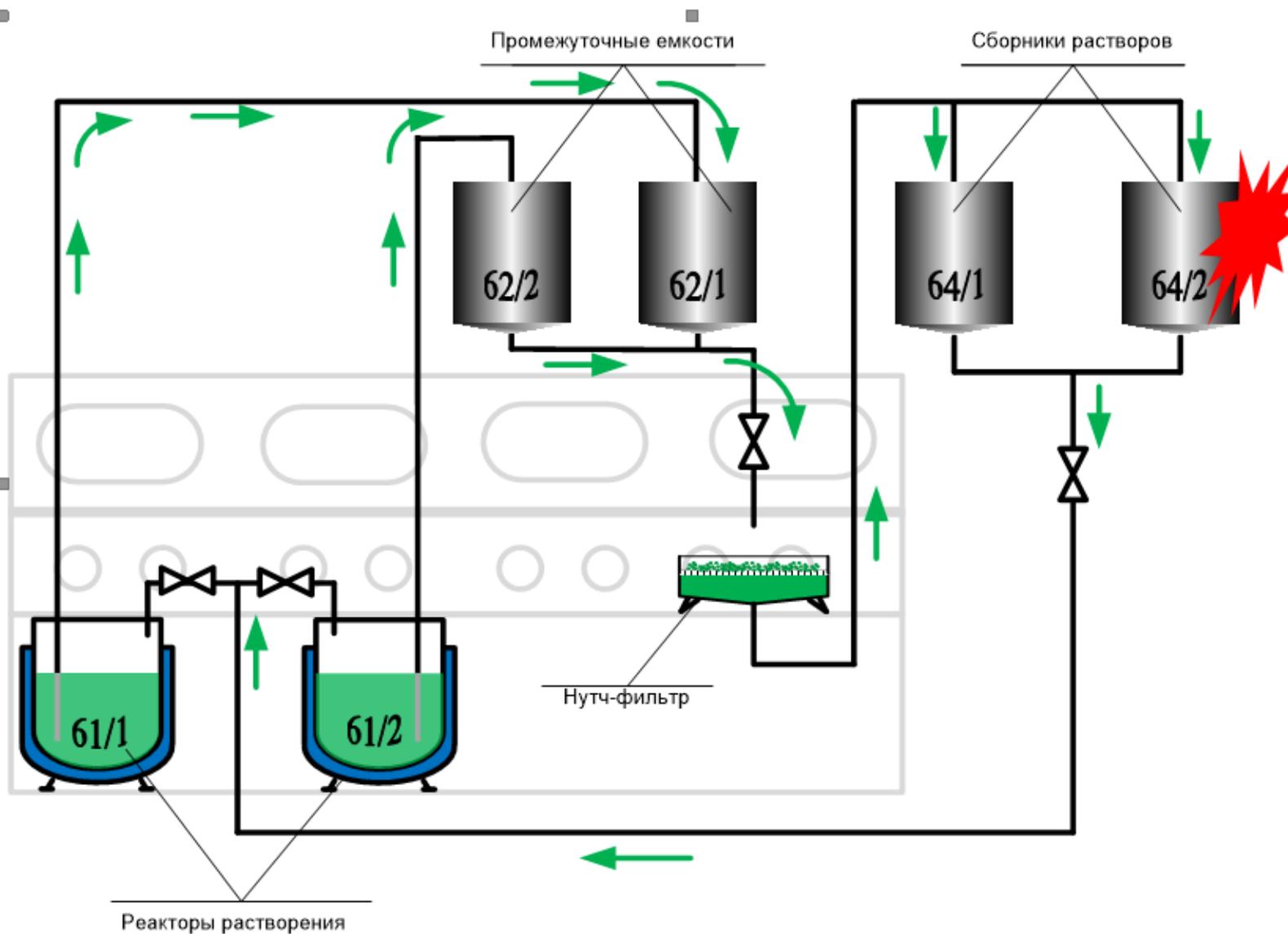


30 января в 18 часов 10 минут в цехе 2 ХМЗ сработала аварийная сигнализация. Персонал экстренно покинул цех. В результате анализа операций, проводимых в это время, и изучения дозиметрической обстановки было установлено, что СЦР произошла в одном из сборников растворов урана на установке растворения технологических отходов (оборотов производства).

Аппаратурная схема установки представляла собой простую технологическую систему:

- отходы загружались в реакторы 61/1 и 61/2;
- раствор из реакторов вакуумом передавался в промежуточные емкости 62/1 62/2;
- затем раствор фильтровался через нутч-фильтр в сборник 64/1 или 64/2;
- допускалось возвращать растворы с низкой концентрацией урана из сборников 64/1 и 64/2 в реакторы для растворения последующих партий отходов.

СХК г. Северск, январь 1963 г.



СХК г. Северск, январь 1963 г.



Все оборудование было опасной геометрии. Предотвращение критичности обеспечивалось исключительно ограничением массы ДМ загружаемых в реактор-растворитель, которая рассчитывалась по результатам химического анализа на содержание урана в отходах.

30 января на установку поступили два контейнера с отходами с результатами лабораторного анализа проб, выраженными **в процентах (~18%)**.

Начальник смены в задании операторам записал результат анализа **не в %, а в г/кг, т.е.**

не 18 % U²³⁵ на 1 кг отходов, а 18 г U²³⁵ на 1 кг отходов!

Тем самым ошибочно уменьшил реальное содержание урана в отходах в десять раз!

СХК г. Северск, январь 1963 г.



В реактор 61/1 было загружено 2 кг отходов из одного контейнера и 5 кг из другого, что по расчетам через содержание урана г/кг соответствовало бы массе урана 126 г, т.е. значительно меньше безопасного значения.

В следующую смену после завершения операции раствор был передан в сборник 64/1. От раствора была отобрана проба. Результат анализа был передан **по телефонной связи** операторам установки. Из лаборатории **ошибочно сообщили результат для раствора не из сборника 64/1, а из 64/2**, где концентрация урана была в ~10 раз меньше.

Начальник смены на основании этой информации принял решение использовать этот «бедный» раствор для растворения следующей партии отходов с массой 1255 граммов.

Оператор передал раствор из сборника 64/1 в реактор-растворитель, в котором таким образом оказалось более 2500 г урана .

По завершению операции растворения началась передача раствора в сборник 64/2.

В 18 ч 10 мин 30 января уровень раствора превысил критическую высоту, и возник первый пик мощности цепной реакции.

В реакторе критическое состояние не было достигнуто во время процесса растворения, поскольку он был установлен в относительно свободном пространстве, в то время как у сборника 64/2 с двух сторон имелся отражатель в виде кирпичных перегородок.

СХК г. Северск, январь 1963 г.



Параметры аварийной системы в аппарате 64/2:

Объем раствора, л	35,5;
Концентрация U^{235} в растворе, г/л	~71,0;
Масса урана U^{235} , г	2520,0.

СЦР имела осциллирующий характер и длилась около 10 часов. За это время произошло 8 вспышек различной интенсивности.

С целью прекращения реакции было принято решение разделить раствор, для чего часть раствора была перекачена по временным линиям в контейнеры объемом 5 литров.

В момент возникновения СЦР в отсеке, где размещался аппарат 64/2, персонала не было. Четыре человека, находившиеся на расстоянии около 10 метров от очага СЦР, получили дозы внешнего облучения от 6 до 17 рад.

Причины аварии:

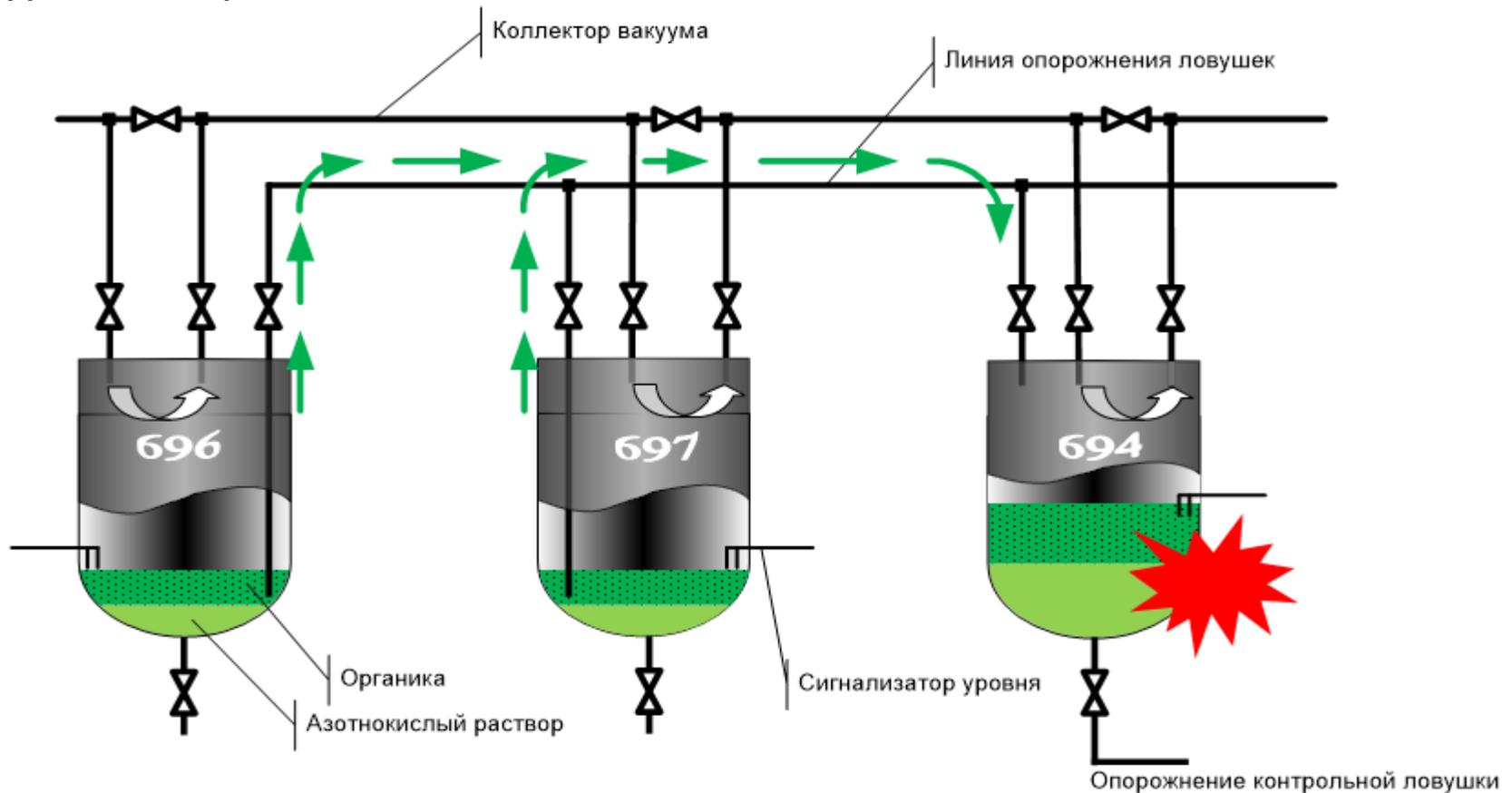
- применение в технологии переработки ЯДМ опасного оборудования;
- использование при оформлении результатов анализа проб разных размерностей;
- передача результатов анализа устно по телефонной связи.

СХК г. Северск, декабрь 1963 г.

СЦР произошла 2 декабря 1963 года в 23 часа 45 минут в отделении регенерации урана.

Сработала САС, персонал немедленно покинул цех.

Оценка дозиметрической обстановки показала, что СЦР произошла в отсеке вакуумных ловушек.



СХК г. Северск, декабрь 1963 г.



Передача растворов урана в отделении из одного технологического аппарата в другой, а также с одной установки на другую выполнялась с помощью вакуума. При этом какое-то количество раствора попадало в вакуумную систему в виде капель, брызг, конденсата. Раствор попадал в эту систему также в случаях переполнения какого либо аппарата. Для защиты оборудования системы вакуума от попадания в него технологических растворов на коллекторе вакуума и были установлены 3 ловушки - две рабочих (№696, №697) и одна контрольная (№694).

Ловушки представляли собой цилиндрические аппараты с полусферическим днищем опасной геометрии диаметром 500мм, объемом 100л.

В ловушках, по причинам о которых уже было сказано, происходило постепенное накопление, как азотнокислых растворов урана, так и жидких органических реагентов, применявшихся на операциях экстракции. При этом в них происходило расслоение азотнокислого раствора (нижний слой) и органической фазы (верхний слой).

Ловушки были оснащены сигнализаторами уровня, реагирующими на токопроводящую среду, т.е. сигнализаторы срабатывали при контакте с азотнокислыми растворами и **не фиксировали наличия органической фазы - слоя экстрагента!**

СХК г. Северск, декабрь 1963 г.



В обычном, регламентном режиме ловушки №696 и №697 опорожнялись до 4-х раз в сутки по показаниям сигнализаторов уровня. А вот из ловушки №694 непосредственно перед аварией раствор не выдавался в течение 8 суток, так как сигнализатор (датчик сигнализатора в этой ловушке был установлен значительно выше, чем в двух других) ни разу за это время не сработал – не реагировал на органическую фазу, а значит, в этой ловушке создавались условия для бесконтрольного накопления органики, что и привело к возникновению СЦР.

Параметры аварийной системы в вакуумной ловушке №694

Объем экстагента, л 60-65;
Концентрация U^{235} в экстр, г/л 33;
Масса урана U^{235} , г > 2000.

За 16 часов произошло 16 всплесков мощности.

СЦР прекратилась после дистанционного залива в ловушку раствора азотнокислого кадмия.

Облучение персонала значительными дозами не произошло, максимальная доза не превысила 5 рад. Разрушения оборудования, загрязнения производственных помещений и территории не было.

СХК г. Северск, декабрь 1963 г.



Причины аварии:

- применение в технологии переработки ЯДМ опасного оборудования;
- неверное техническое решение по выбору средств контроля уровня жидкой фазы в ловушках;
- отсутствие инструментального контроля накопления ДМ в ловушках;
- несоблюдение периодичности и регламента промывки вакуумных ловушек.

СХК г. Северск, декабрь 1978 г.



СЦР произошла 13 декабря 1978 года в боксе 1392 установки №13 металлургического отделения цеха регенерации плутония.

Установка 13 предназначалась для взвешивания слитков плутония, отбора проб, временного хранения слитков, и представляла собой следующее:

два перчаточных бокса – 1391 и 1392;

бокс 1391 имел два отсека – 1391/1 и 1391/2;

в боксе 1392 и отсеке 1391/2 размещались контейнеры;

в отсеке 1391/1 были установлены устройство отбора проб и весы.

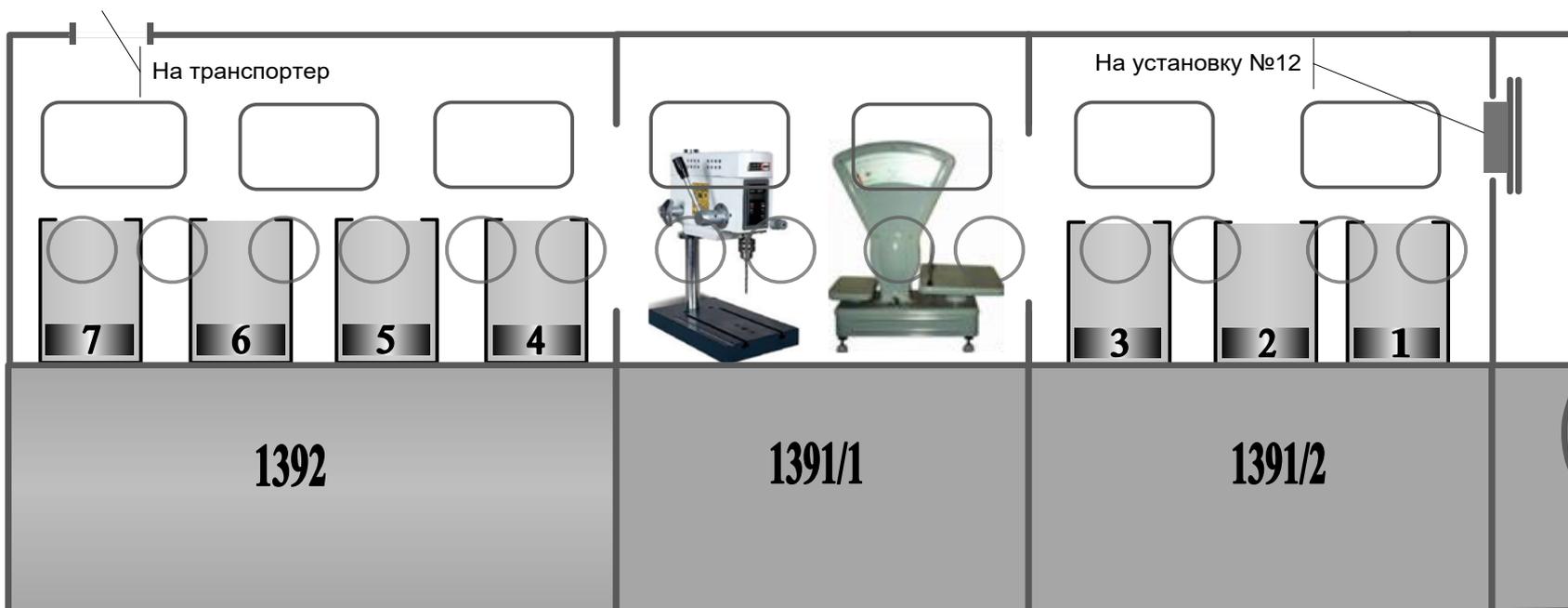
Для того чтобы исключить нейтронное взаимодействие между слитками, хранящимися в смежных контейнерах, корпус каждого контейнера имел защищающую оболочку из кадмия и полиэтилена.

Норма загрузки контейнера – 4 кг, при этом было введено дополнительное ограничение – один слиток в контейнере.

Размеры внутренней полости контейнера значительно превышали размеры слитка. При размещении слитков друг на друга, т.е. выстраивая в контейнере цилиндр, массу такого цилиндра можно было довести до 11 кг. Неблагоприятный по ядерной безопасности объем контейнера стал одной из причин критического инцидента.

СХК г. Северск, декабрь 1978 г.

К началу смены на установке №13 находились семь слитков плутония разной массы по одному слитку в каждом контейнере; в боксе 1393 – 4 слитка, а в отсеке 1391/2 – три.



СХК г. Северск, декабрь 1978 г.

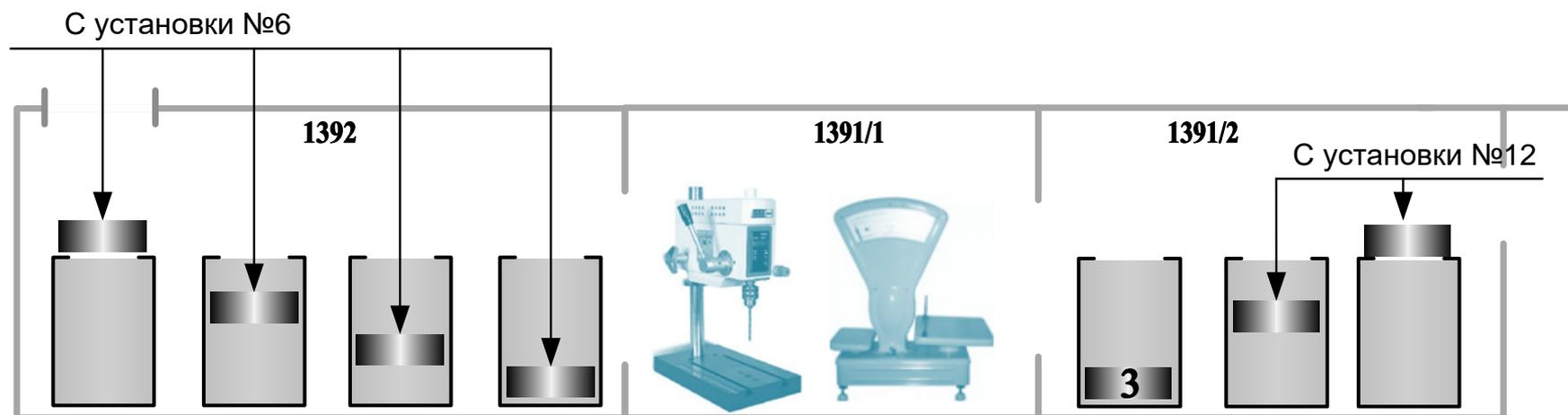
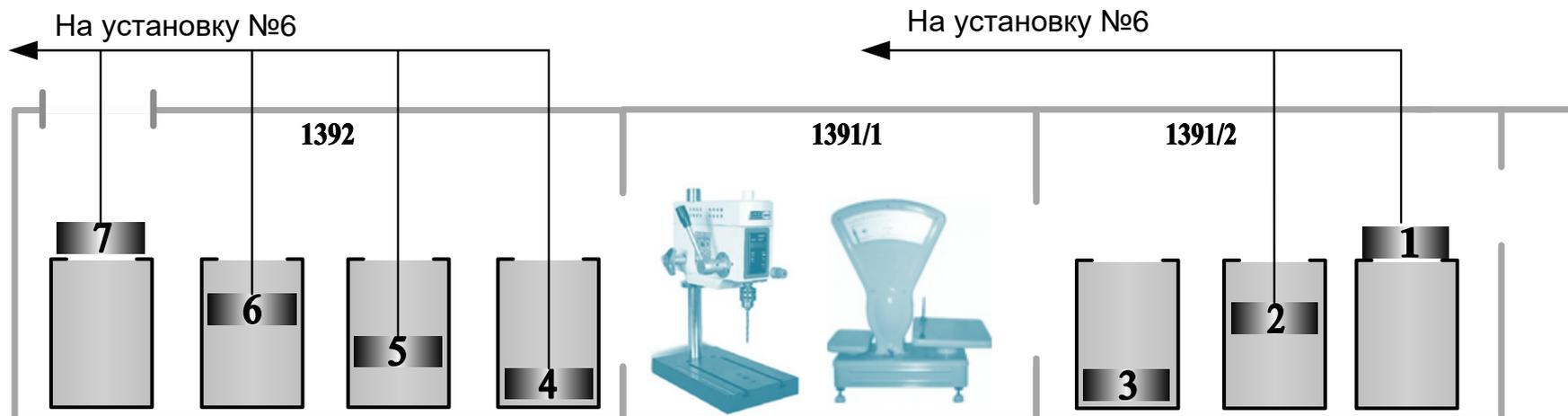


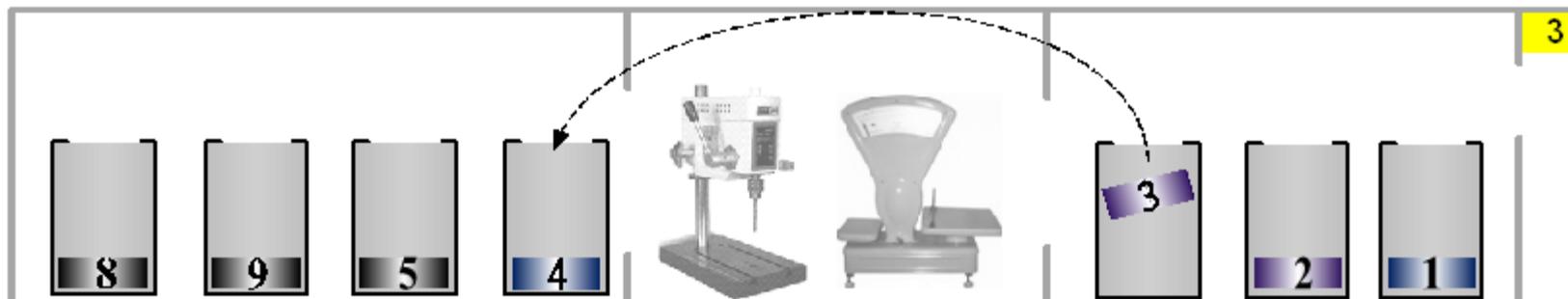
Схема перемещения слитков согласно сменному заданию

СХК г. Северск, декабрь 1978 г.

На установку №6



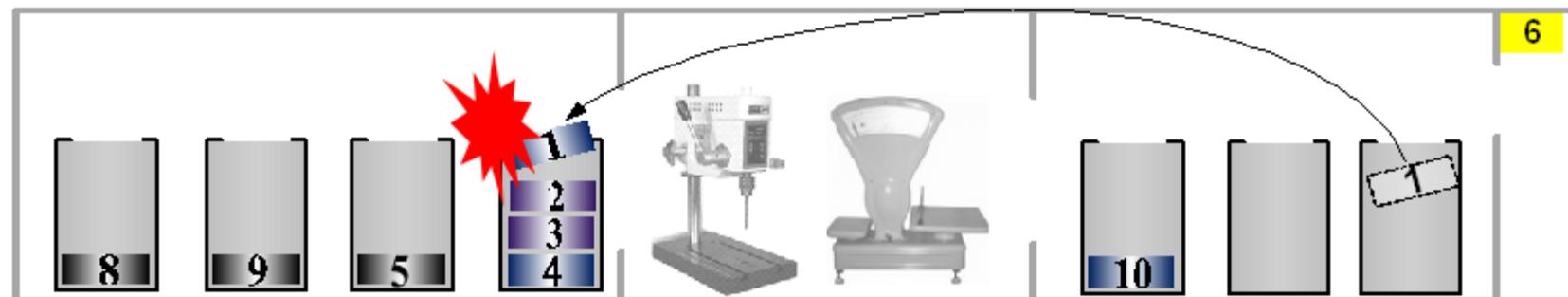
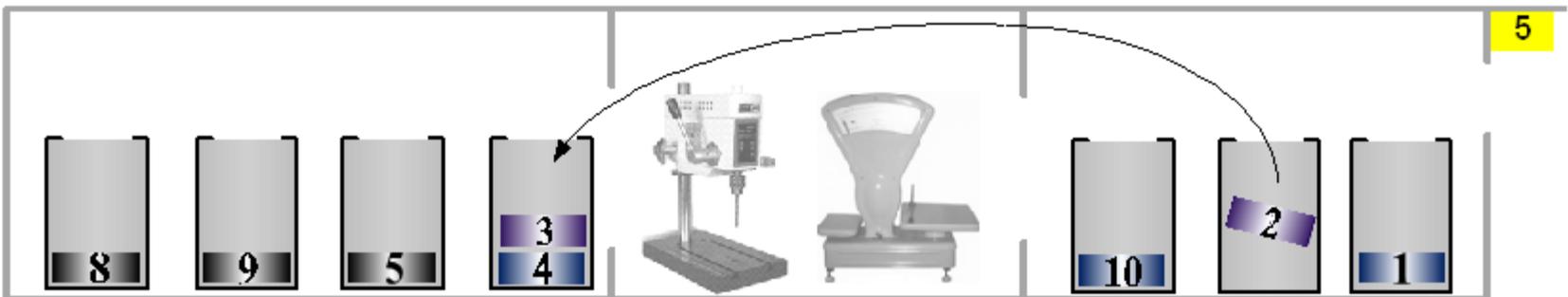
С установки №6



СХК г. Северск, декабрь 1978 г.



С установки №12



СХК г. Северск, декабрь 1978 г.



Мощность дозы γ -излучения в проемах камерных перчаток бокса составила 3000-4000 мР/час.

Семь человек, находившихся на разных расстояниях от установки 13, были облучены дозами от 5 до 60 рад.

Оператор **С...** получил дозу внешнего облучения до 250 рад. Доза на кисти рук превысила 2000 рад, что привело к ампутации обеих рук.

7 человек, находившихся поблизости, получили дозы от 5 до 60 рад.

Причины аварии и ее последствий

- применение для хранения слитков контейнеров с большим объемом внутренней полости;
- ограниченные размеры бокса 1393 – контейнер, в котором произошла СЦР, находился в зоне недоступного обзора внутренней полости;
- работа оператора в соответствии со сменным заданием на нескольких установках;
- отступление от сменного задания в части последовательности передачи слитков;
- работа на установке одновременно двумя операторами и несогласованность их действий;
- умышленное нарушение одним из операторов нормы загрузки контейнера.

НЗХК г. Новосибирск, май 1997 г.

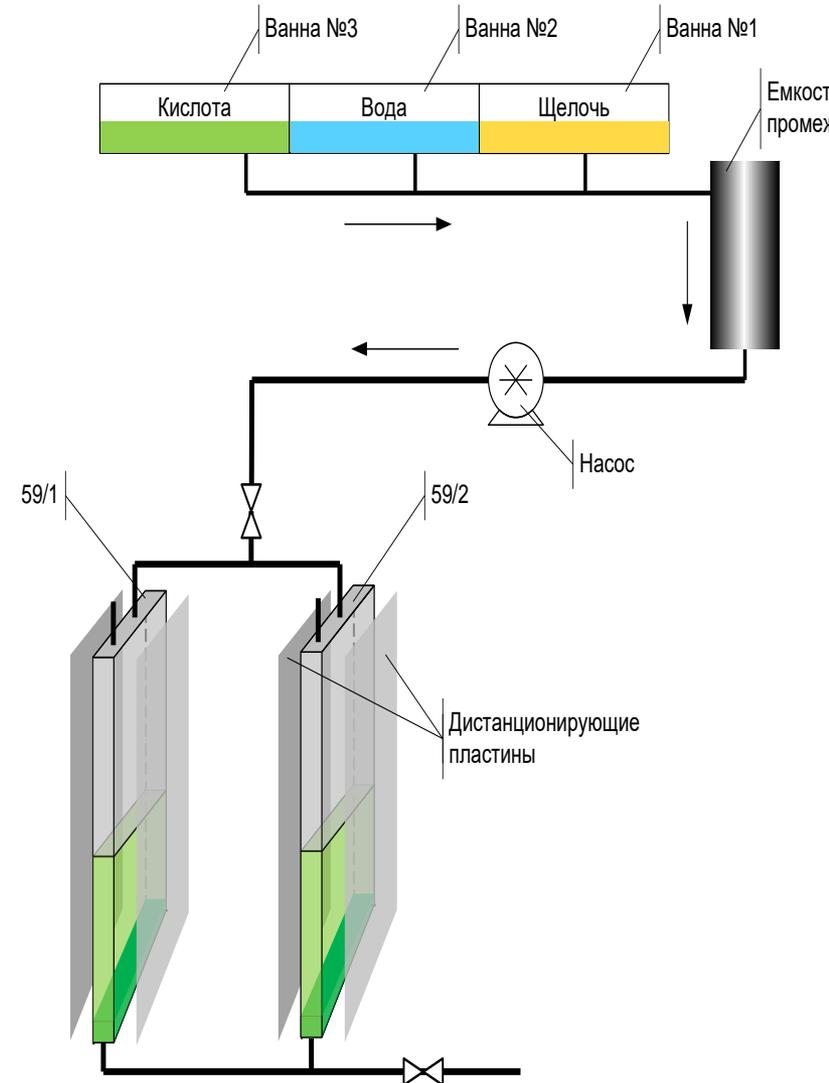


Авария произошла в цехе, где методом порошковой металлургии производятся сердечники твэл из дисперсионного материала ($UO_2 + Al$), в котором обогащение урана составляет до 90% по ^{235}U .

□ Конечной операцией перед очехловыванием сердечников в алюминиевую оболочку является их химическое травление с целью устранить микродефекты на поверхности сердечников и обеспечить плотный контакт между сердечником и его оболочкой.

□ В процессе травления партия сердечников последовательно погружается в три ванны, заполненные соответственно $NaOH$, H_2O и HNO_3 , при этом частично выщелачивается диоксид урана, осаждающийся на дно ванны.

□ В третьей ванне скислотой происходит растворение частиц UO_2 с поверхности сердечников и окончательная нейтрализация следов щелочи.



НЗХК г. Новосибирск, май 1997 г.



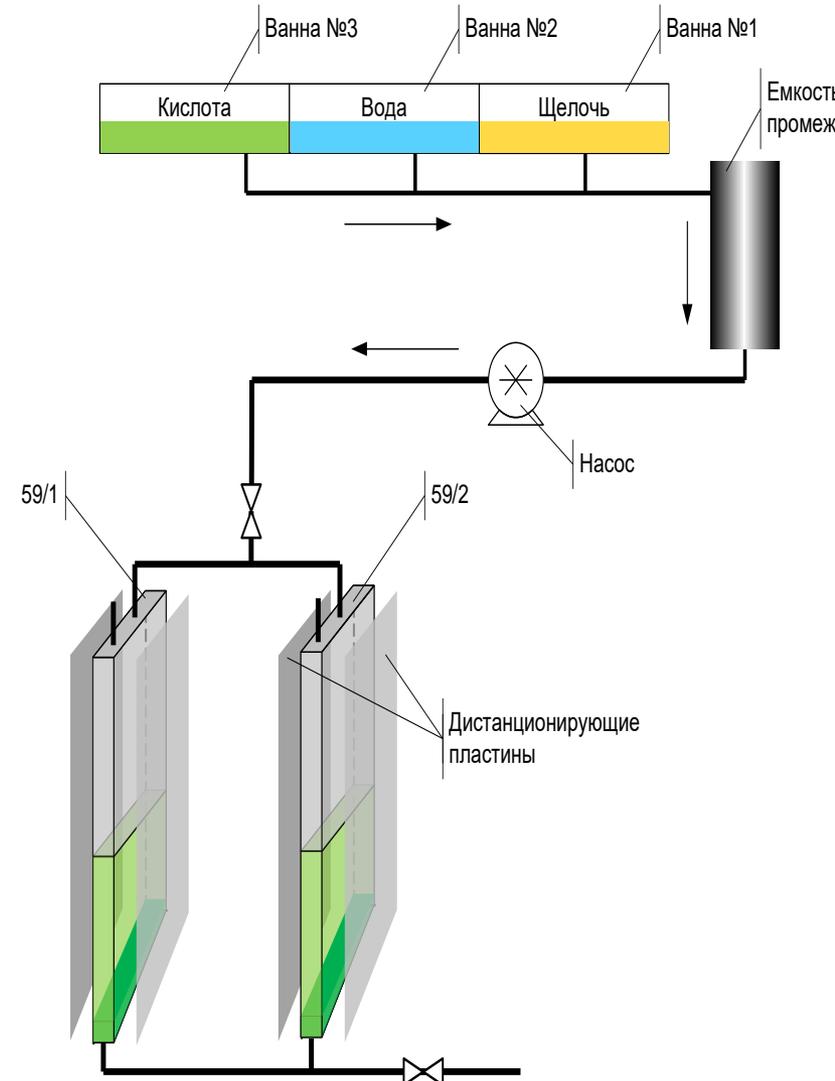
❑ Процесс травления был стандартизирован и контролировался в течение 13 лет до возникновения ядерной аварии только посредством поддержания основных технологических параметров :

- количества сердечников в партии,
- температуры,
- концентрации реагентов,
- длительности операций.

❑ Концентрация урана в растворах не измерялась.

❑ Не контролировалась и не учитывалась возможность образования осадков и отложений урана в оборудовании и коммуникациях.

❑ Отсутствие аналитического контроля концентраций урана объяснялось тем, что все оборудование, за исключением ванн, имело безопасную геометрию (согласно конструкторской документации)



НЗХК г. Новосибирск, май 1997 г.



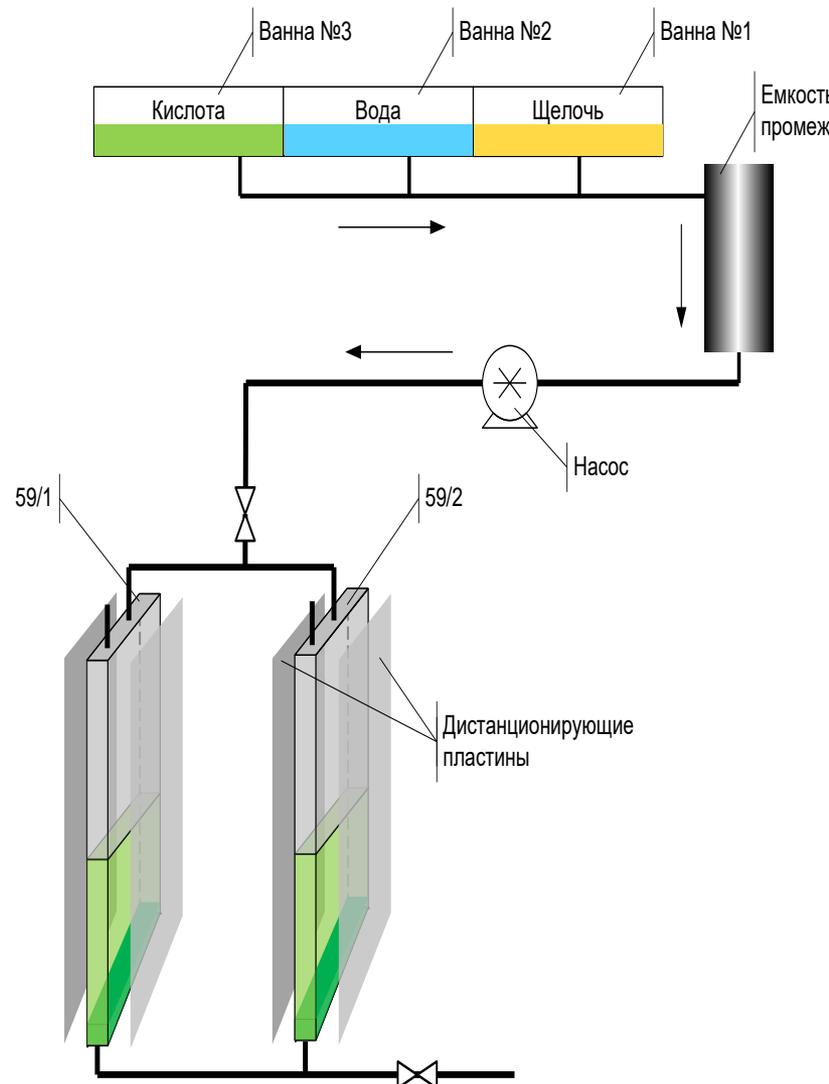
□ Впервые образование плотного осадка диоксида UO_2 в коллекторе было обнаружено в 1996 году после его вскрытия и обследования.

□ Из коллектора было извлечено 5,5 кг осадка с массовой долей урана ~69%. Осадок был плотным и извлекался постепенно посредством растворения в азотной кислоте.

□ Выполненные анализы показали, что осадок формировался более 10 лет.

□ Обнаружение осадка в коллекторе не привлекло внимания персонала к поиску отложений урана в коммуникациях и в сборнике 59_{1,2}, так как в них условия ядерной безопасности выполнялись без аналитического контроля урана.

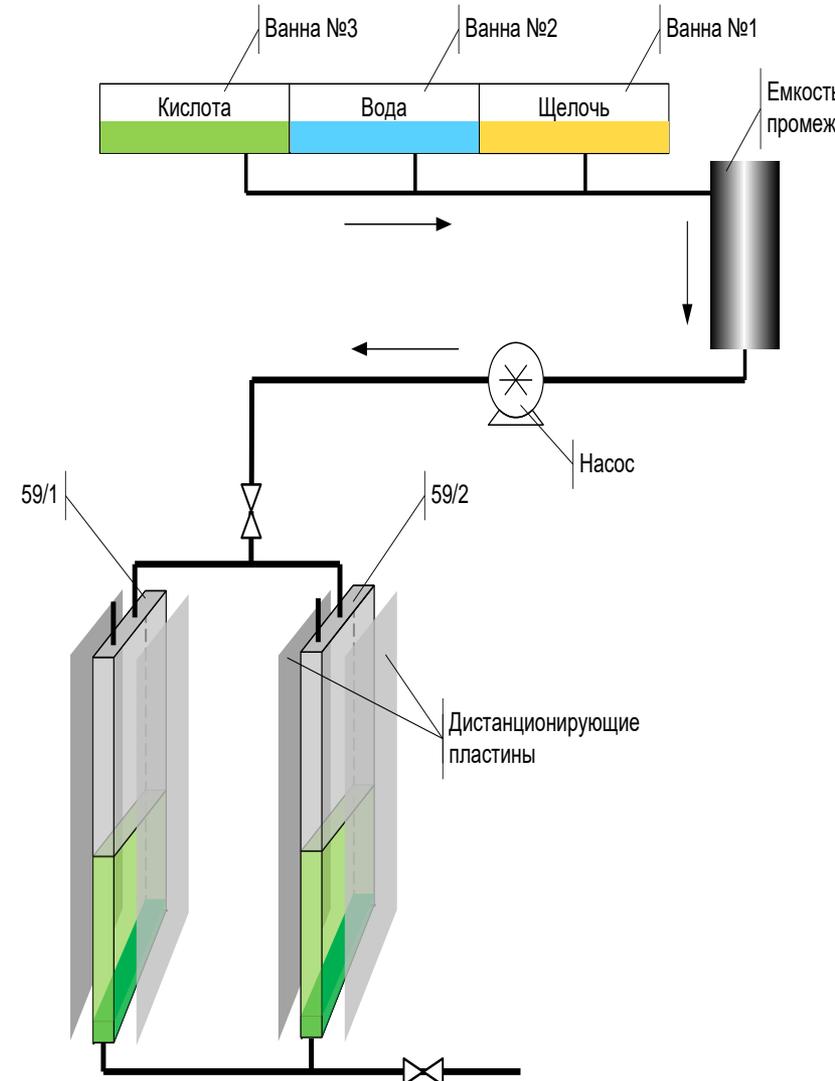
□ В то же время зоной ежегодного баланса урана являлся весь цех, в масштабах которого были пренебрежимо малыми и незаметными потери урана вследствие его частичного осаждения в сборнике 59_{1,2}.



НЗХК г. Новосибирск, май 1997 г.



- ❑ В день аварии аппаратчик узла травления завершил щелочную обработку партии сердечников, слил в коллектор отработанную щелочь и включил на ~15 мин насос для передачи щелочного раствора в сборник 59_{1,2}
- ❑ В 10 ч 55 мин в здании **сработала система аварийной сигнализации (САС)** о возникновении ядерной аварии, имеющая 12 точек контроля.
- ❑ По звуковому сигналу САС сменный **персонал покинул все установленные зоны эвакуации.**
- ❑ Оперативно был закрыт доступ в опасную зону, здание оцеплено охраной, прибыли аварийные службы, дежурные дозиметристы начали обследование радиационной обстановки вне и внутри здания.

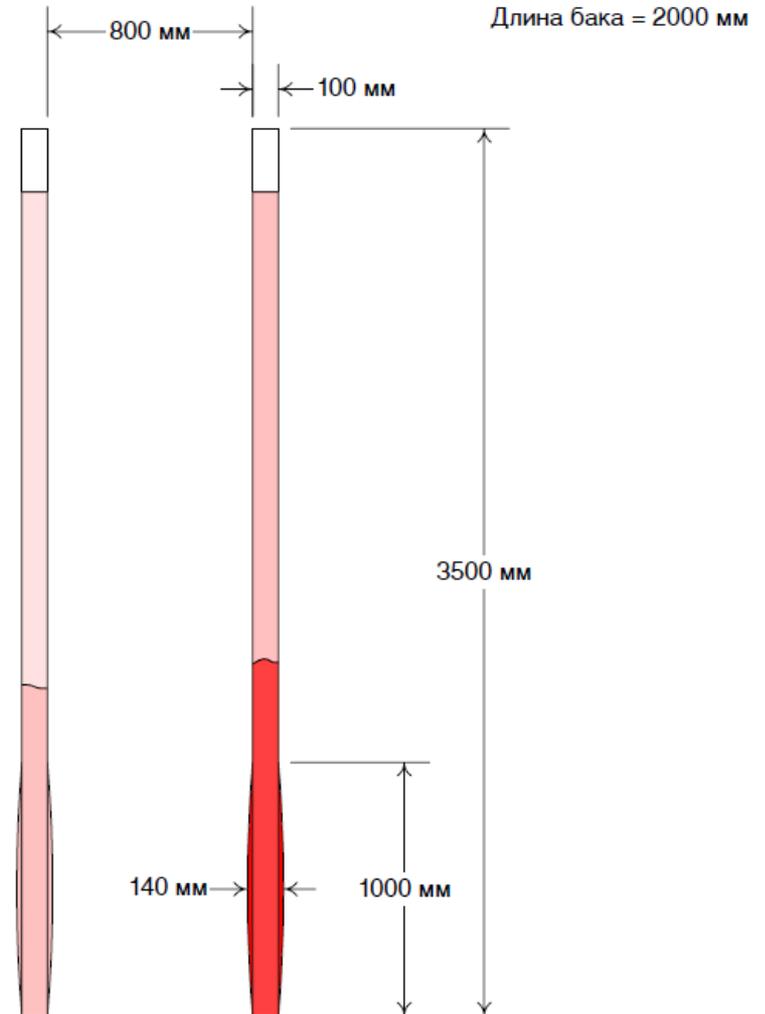


НЗХК г. Новосибирск, май 1997 г.



СХК
РОСАТОМ

- ❑ Оценка массы дала значение $M_u = 7,8$ кг
- ❑ Выполненные расчеты условий критичности (при соответствии геометрических размеров сборников проектным) показали, что критическая масса урана при концентрации U-235 50 г/л и выше **превышает 100 кг, т. е. на много больше $M_u = 7,8$ кг.**
- ❑ Такое расхождение, как и само возникновение аварии, можно было объяснять **несоответствием размеров емкостей сборника проектным**, в особенности увеличением толщины плоских емкостей, наиболее значительно влияющих на критические параметры
- ❑ В результате обследования осадков в сборнике 59_{1,2} было установлено:
 - 1) зоны осадков расположены **в донной части обеих емкостей**, имеют близкую геометрию и боковую площадь ~ 1 м² каждая;
 - 2) масса осадка в емкости 59/1 примерно **в 2,8 раза больше**, чем в емкости 59/2.

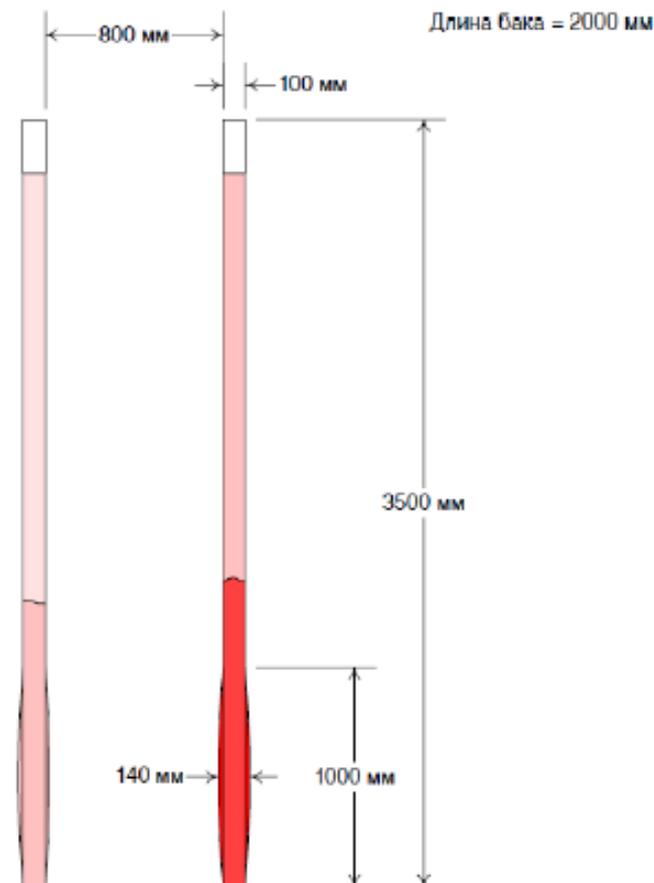


НЗХК г. Новосибирск, май 1997 г.



СХК
РОСАТОМ

- Была составлена (в результате измерений) подробная картограмма толщин для обеих емкостей сборника 59_{1,2}.
- В отдельных точках внутренний зазор составил **132 мм**, т. е. был на **32%** выше проектного значения.
- В среднем по зоне локализации осадков увеличение толщины было около **17%**, или **117 мм**, что существенно повлияло на возникновения условий критичности в сборнике 59_{1,2}.
- Места обнаружения твердых отложений **близко совпадали** с местами деформации емкостей.
- Причины деформации сборника остались неизвестны.
- Дозы облучения персонала были незначительными. Коллективная доза для группы из 20 человек не превысила 4 мЗв.
- Оборудование осталось целым. Материальный ущерб от аварии определялся остановкой производства в цехе на 3 месяца.
- Были разработаны мероприятия по контролю накопления урана и геометрических размеров оборудования



Накопление осадка обогащенного урана (90%) в донных областях двух параллельных емкостей плоской геометрии

Заключение

Анализ имевших место аварий позволяет провести классификацию делящихся материалов по их опасности: наибольшую опасность представляют обогащенный уран и плутоний, а по агрегатному состоянию - их водные растворы или водородосодержащие смеси (Из 13 аварий 12 произошло в водородсодержащих системах). Это объясняется тем, что минимальная критическая масса делящихся нуклидов достигается именно в таких системах, а наиболее широко используются водные технологии.

Системы, содержащие растворы, обладают повышенной опасностью еще и потому, что возникшая в растворах цепная реакция, как правило, не ограничивается одной вспышкой, а носит осциллирующий характер, что осложняет действия по ликвидации аварии. Хотя этот эффект наблюдался и в экспериментах, и хорошо знаком специалистам по ядерной безопасности, в аварийной ситуации этот момент выпускается из виду из-за естественного желания поскорее установить контроль над ситуацией и системой. В связи с этим необходимо отметить один существенный момент при аварии: противоаварийные мероприятия должны проводиться лишь после того, как будут абсолютно понятны особенности создавшейся аварийной системы и есть уверенность, что планируемые действия адекватны (соответствуют) сложившейся ситуации. Единственным побудительным мотивом для экстренных действий может служить угроза персоналу и населению.

Заключение

В нескольких авариях делящийся материал накапливался длительное время в оборудовании, где по условиям нормального технологического процесса его не должно было быть. Низкий темп накопления делящихся материалов не позволял зарегистрировать его потери средствами учета и контроля и не сказывался на балансе материалов на установке, так как потери не превышали нормативных значений. Для того, чтобы избежать такой ситуации оборудование периодически должно подвергаться детальному обследованию с применением надежных методик и приборов, а также должны выполняться периодические зачистки оборудования.

Еще один вывод из происшедших аварий – это необходимость наличия систем аварийной сигнализации для оповещения персонала об экстренной эвакуации в случае СЦР. Там, где имелись такие системы, они показали свою эффективность. Быстрая эвакуация персонала после срабатывания системы аварийной сигнализации позволила снизить дозовые нагрузки на персонал и вывести из-под действия радиации множество людей.

Спасибо за внимание

Чередов Вячеслав Михайлович
Инженер-технолог (по ЯБ), ведущий ОЯБ АО «СХК»

Моб. тел.: +7 (952) 899 99 37
E-mail: vmcheredov@rosatom.ru

16.05.2022