

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение	5
1 Радиоактивные отходы. Характеристика	6
1.1 Общая характеристика радиоактивных отходов	6
1.2 Основные требования по обращению с радиоактивными отходами	6
2 Очистка и переработка жидких радиоактивных отходов	11
3 Технологический расчёт установки по переработке радиоактивных отходов на предприятии атомной отрасли	14
3.1 Расчёт ионообменного фильтра с кипящим слоем ионита	14
3.2 Расчёт двухкорпусной выпарной установки	18
4 Выбор метода отверждения и хранения жидких радиоактивных отходов	24
4.1 Битумирование как один из способов отверждения жидких радиоактивных отходов	24
4.2 Выбор контейнера для хранения радиоактивных отходов	30
Заключение	
Библиографический список	31

## **ВВЕДЕНИЕ**

Создание эффективной системы безопасного обращения с радиоактивными отходами является принципиальным условием дальнейшего развития атомной энергетики и промышленности.

Цель данной работы – выбор основного технологического оборудования переработки радиоактивных отходов, а именно расчет фильтра и выпарной установки для очистки ЖРО, выбор метода отверждения жидких РАО и выбор контейнера для дальнейшего хранения отходов.

Для этого необходимо изучить классификацию и характеристику радиоактивных отходов, методы очистки и утилизации радиоактивных отходов, способы отверждения жидких радиоактивных отходов.

# 1 РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ. ХАРАКТЕРИСТИКА

## 1.1 Общая характеристика радиоактивных отходов.

Радиация и радиоактивные вещества естественным образом присутствуют в окружающей среде, также они могут быть и результатом деятельности человека. С успехом их используют в целом ряде областей — от производства энергии до медицины, промышленности и сельского хозяйства. Эта деятельность ведет к образованию отходов в различных их формах. Они являются радиоактивными: атомы в них не устойчивы, и в процессе трансформации в устойчивые — спонтанно испускают ионизирующее излучение. Испускаемое излучение может нанести непоправимые последствия как для жизни людей в настоящее время, так и для будущих поколений, а также наносит вред окружающей среде. Этим и обусловлена важность безопасного обращения с отходами для защиты населения и окружающей среды. Радиоактивные отходы (РАО) — отходы, содержащие радиоактивные изотопы химических элементов и не имеющие практической ценности.

К РАО относятся: вещества, материалы, изделия, оборудование, радиоизотопные источники, объекты биологического происхождения, загрязненные объекты внешней среды, содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные нормами радиационной безопасности.

## 1.2 Основные требования по обращению с радиоактивными отходами

Основное требование любого принципа обращения с радиоактивными отходами всех категорий: отходы должны обрабатываться, перерабатываться, храниться, транспортироваться и захораниваться так, чтобы на протяжении всего срока их потенциальной опасности негативное воздействие на человека и окружающую среду как в настоящее время, так и в будущем не превышало

пределов, установленных соответствующими нормативными документами, в независимости от того, где, когда и в какой форме образуются РАО.

Для достижения вышеперечисленной цели необходим системный подход в обращении с РАО, для каждой страны он определяется законодательством, в котором отражены нормы и правила по защите населения и охране окружающей среды и т.д. В любой стране существует техническая политика, в которой предусмотрено комплексное решение проблемы обращения с РАО как на действующих, так и на проектируемых (строящихся) объектах атомной отрасли, начиная с момента образования РАО и кончая их надежной изоляцией от биосферы на весь срок сохранения отходами потенциальной опасности.

Поскольку некоторые радиоактивные отходы могут представлять опасность в течение длительного времени (и для будущих поколений), должна учитываться необходимость дополнительных затрат в будущем на обеспечение радиационной защиты, контроля, наблюдения. Радиоактивные отходы образуются в различных формах с различными физическими и химическими характеристиками, такими как концентрации и периоды полураспада составляющих их радионуклидов. Эти отходы могут образовываться в газообразной (вентиляционные выбросы установок обработки радиоактивных материалов), жидкой (начиная от растворов сцинтилляционных счетчиков из исследовательских установок до жидких высокоактивных отходов, образующихся при переработке отработавшего топлива) и твердой (загрязненные расходные материалы, отходы от переработки топлива или отработавшего топлива от АЭС и т.д) формах.

### **1.3 Виды и классы радиоактивных отходов.**

В основном выделяют два вида РАО :

- 1) жидкие радиоактивные отходы (ЖРО);
- 2) твердые радиоактивные отходы (ТРО).

По классификации РАО подразделяют на :

- 1) очень низкоактивные;

- 2) низкоактивные;
- 3) среднеактивные;
- 4) высокоактивные

## **ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ**

В процессе очистки радиоактивных вод на специальных установках водоочистки образуются три вида ЖРО: 1) отработанные ионообменные смолы; 2) дисперсные осадки (шлам); 3) солевые высококонцентрированные растворы (кубовые остатки). Для переработки ЖРО будут применяться современные специальные технологии: ионоселективная сорбционная очистка, цементирование. Перед подачей на установку отверждения предусмотрен сбор ЖРО в емкости узла временного хранения, где происходит снижение их уровня активности в течение трех месяцев. 87

Строительные конструкции помещений хранилищ ЖРО емкости сбора ЖРО выполнены по I категории сейсмостойкости. Емкости сбора ЖРО имеют дублированный контроль за уровнем ЖРО, вентиляцию и находятся под разряжением. Комплекс переработки ЖРО будет оборудован системой автоматического дистанционного управления и защиты, исключающей попадание ЖРО в окружающую среду.

## **ТВЕРДЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ (ТРО)**

Для сокращения объема ТРО подвергаются первичной сортировке, измельчению, прессованию и сжиганию в специальных установках. Переработанные ТРО и отвержденные ЖРО закладываются на временное хранение в наземные хранилища, состоящие из железобетонных ячеек, расположенных в специальном корпусе со зданием переработки ТРО. Система кондиционирования и хранения ТРО разработана с учетом нормальной эксплуатации и возможных аварийных ситуаций, включая землетрясения интенсивностью до 7 баллов. Предусмотрена возможность расширения хранилищ ТРО для обеспечения приема отходов в течение всего срока эксплуатации АЭС. Безопасность персонала, населения и окружающей

природной среды при кондиционировании и хранении РАО обеспечена за счет выполнения специальных мероприятий и технологий с применением системы барьеров на пути возможного распространения радиоактивных веществ в окружающую среду. Поэтому поступление радиоактивных веществ в окружающую среду при обращении с РАО при нормальной эксплуатации исключено, а в случае возникновения аварийных ситуаций не будет превышать допустимых величин. Технические решения проекта в части обращения с РАО проработаны достаточно подробно и не противоречат санитарно-гигиеническим и экологическим требованиям. Полигон переработки и захоронения твердых промышленных нерадиоактивных отходов Сооружения полигона размещаются в санитарнозащитной зоне порядка 2000 м от береговой полосы водохранилищ [4]. Полигон предназначен для централизованного сбора, сортировки, переработки и захоронения твердых нерадиоактивных отходов. К ним относятся: сульфуголь, ионообменные смолы, шламы сухих солей, песок от очистки хозяйственнобытовых стоков, пластмассы и линолеумы, промышленная ветошь, металлолом, дерево, ДСП и т.п. На территории полигона размещаются: здание временного хранения отходов, здание переработки и сооружения длительного хранения и захоронения. Промышленные отходы поступают от места их образования в здание временного хранения отходов, которое состоит из трех секций: хранилище взрывоопасных веществ, хранилище горючих отходов и хранилище прочих отходов. Здание переработки отходов, соединенное галереями со зданием временного хранения, имеет отделение сжигания, оборудованное специальной печью. Отходящие печные газы подвергаются грубой очистке на металлотканевых фильтрах и после охлаждения, проходя через фильтры тонкой очистки, выбрасываются через стальную трубу высотой 35 м в атмосферу. Коэффициент очистки от аэрозолей составляет порядка 99,9 %. Зола из печи в контейнерах направляется в сооружения длительного хранения. По технологии предусматривается сортировка, измельчение

отходов, пакетирование металлических отходов. Для наблюдения за уровнем и качеством грунтовых вод предусматривается скважины: 1 скважина выше (севернее) и 2 скважины (южнее) ниже полигона. Проект полигона по переработке и захоронению твердых промышленных отходов выполняется в соответствии с действующими санитарногигиеническими, противопожарными и другими нормами, инструкциями и государственными стандартами. Реализация проекта дает возможность утилизировать значительную часть нетоксичных отходов. Предусмотрена концентрация токсичных отходов и их захоронение в специальных хранилищах. Технологические приемы обращения с промышленными нерадиоактивными отходами направлены на охрану окружающей природной среды и соответствуют природоохранным требованиям. К примеру, полигон такого вида успешно эксплуатируется на Кольской АЭС.

## **2 ОЧИСТКА И ПЕРЕРАБОТКА ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Переработка жидких радиоактивных отходов (ЖРО) направлена на решение двух главных задач: очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирования последних в минимальном объеме. Для этого используют как минимум три группы методов: термические, сорбционные, мембранные.

Термические и сорбционные методы достаточно хорошо разработаны и широко применяются на практике: в настоящее время на их основе работают очистные сооружения, перерабатывающие отходы, которые образуются при эксплуатации ядерных реакторов различного назначения, установок регенерации ядерного топлива и других объектов, использующих радиоактивные вещества.

Рассмотрим эти методы подробнее

### **1. Термические методы**

Термические методы предполагают использование тепла для очистки

и концентрирования отходов переводом основного компонента отходов – воды – в пар. Поэтому осуществление термических процессов требует расхода большого количества тепла, что представляет собой существенный их недостаток.

Основные термические методы – дистилляция (упаривание) и сушка. Сушка обычно используется для подготовки (обезвоживания) концентратов радиоактивных отходов к отверждению. Дистилляция (упаривание) – широко распространенный метод переработки жидких отходов. В том случае, когда решается проблема очистки, получения конденсированного конденсата, он называется дистилляцией, а когда в задачу его входит концентрирование – упариванием. Дистилляция (упаривание) в основном различается характером парообразования (кипение в объеме или испарение с поверхности), видом теплоносителя (пар, горячие газы, электричество, органические продукты) и способом подвода тепла (непосредственный контакт с теплоносителем или передача тепла через стенку аппарата). В практике обезвреживания отходов наиболее широко применяют дистилляцию парообразованием при кипении с подводом тепла водяным паром через стенку выпарного аппарата. Такая организация процесса обеспечивает достаточно хорошую теплопередачу при отсутствии контакта чистого теплоносителя с радиоактивным упариваемым раствором.

В отличие от других методов дистилляция позволяет очистить конденсат от радионуклидов, находящихся в любой форме: ионной, молекулярной или коллоидной. Ограничивает очистку в этом случае только летучесть радионуклидов. Невысокая требовательность к качеству отходов, поступающих на дистилляцию (наличие коллоидов, детергентов), позволяет исключить применение перед ней специальных осадительных операций. Это выгодно отличает дистилляцию от сорбционных (динамических) и некоторых мембранных методов. И, наконец, возможность получения высоких коэффициентов очистки позволяет дистилляции при необходимости самостоятельно и полностью решить проблему очистки конденсата до



сбросных норм или норм на оборотную воду.

## 2. Сорбционные методы

Сорбционные методы, предполагают поглощение радионуклидов твердой фазой по любому механизму: адсорбция, ионный обмен, сокристаллизация, окклюзия, адгезия и т.п. Сорбция проводится как в динамических, так и в статических условиях. Динамическая сорбция предполагает осуществление ее путем непрерывного фильтрования очищаемого раствора через слой сорбента. Статическая сорбция исключает направленное движение сорбента и очищаемого раствора относительно друг друга, а предполагает временный разовый контакт фаз (при перемешивании) с последующим их разделением.

## 3. Мембранные методы

Из мембранных методов для переработки ЖРО наибольший интерес представляют обратный осмос, электродиализ и ультрафильтрация. Эти методы заимствованы из практики опреснения засоленных вод, где основная задача сводится к разделению воды и соли. Такое разделение достигается избирательным прохождением через мембраны ионов (электродиализ) или воды (обратный осмос) под воздействием соответственно разности электрических потенциалов или перепада давления.

Ультрафильтрация отличается от обратного осмоса использованием мембран с более крупными порами, требующих для фильтрования меньших перепадов давления (обычно до 1 МПа). При этом через мембрану проходят воды и соли, а коллоиды и крупные органические молекулы размерами от 2 до 10 000 нм задерживаются.

Основой любого мембранного процесса являются полупроницаемые мембраны. В зависимости от движущей силы они разделяются на баромембранные и электромембранные. Разделение происходит на молекулярном и ионном уровнях из гомогенных растворов, поэтому мембранные процессы только условно можно поставить в один ряд с обычным фильтрованием. Если основным аргументом для проявления

разделяющей способности в баромембранных процессах является размер частиц, то в электромембранных – это знак и величина заряда иона. Соответственно для баромембранных процессов материалом для мембран может стать любое вещество, в котором могут быть сформированы пористые структуры, а для электромембранных процессов мембранный материал должен обладать ионообменными свойствами.

По сути дела, баромембранные процессы – это молекулярная фильтрация под действием давления, а электромембранные – это ионный обмен с постоянной регенерацией ионитов под действием электрического поля. Баромембранные процессы разделения жидких смесей условно выстроены в ряд по размерам задерживаемых мембраной частиц. Обратный осмос позволяет выделить из растворов самые маленькие частицы – ионы, поэтому он получил широкое применение в обессоливании воды. С помощью ультрафильтрации воду очищают от средне- и высокомолекулярных соединений, микрофильтрация эффективна для удаления частиц коллоидного размера. Относительно применимости к переработке ЖРО отметим следующие важные обстоятельства:

- мембранные процессы безреагентны;
- мембранные процессы обладают селективностью, то есть выборочностью действия по отношению к разным веществам;
- мембранные процессы протекают без фазовых превращений, то есть без переходов из жидкого в паровое состояние и обратно.
- утилизация мембран пришедших в негодность, намного проще, чем ионитов, т.к. количество их в десятки раз меньше.

Из-за разнообразия радиоактивных и нерадиоактивных загрязнителей, в том числе из-за наличия аммиака, масел, ни один из упомянутых методов очистки отдельно не обеспечивает очистки ЖРО до необходимой степени, поэтому система очистки ЖРО – сложная цепочка операций, на выходе из которой получают высокоактивный концентрат, поступающий на отверждение и захоронение. Концентраты, полученные в результате очистки

ЖРО, представляет собой шламы после фильтрации и химической обработки, отработавшие ионообменные смолы, кубовые остатки после упаривания. Эти концентраты обычно отверждают методами битумирования, цементирования, полимеризации и др.

### **3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ УСТАНОВКИ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

#### **3.1 Расчёт ионообменного фильтра с кипящим слоем ионита**

##### Исходные данные:

1. Общий объём очищаемых ЖРО –  $V = 1500 \text{ м}^3$
2. Используемый ионит: «Фолиокс», ДОЕ =  $8,9 \text{ кг-экв/м}^3$
3. Удельная производительность –  $q = 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$
4. Максимальная производительность -  $Q = 48 \text{ м}^3/\text{час}$
5. Степень использования ионообменной емкости –  $50 \% (k_c = 0,5)$
6. Солесодержание  $[\text{CoCl}_3]$ ,  $C = 3 \text{ кг/м}^3$
7. Объемная активность по  $\text{Co}^{60}$ :  $A = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ Ки/дм}^3$
8. Насыпная масса сорбента –  $M_H = 0,75 \text{ т/м}^3$
9. Коэффициент набухаемости –  $k_H = 1,13$ .

##### Решение:

Исходя из исходных и справочных данных:

1. Определяем количество выделяемого радионуклида в ЖРО (радионуклид выделяется прямо пропорционально количеству его стабильного изотопа, поэтому расчеты ведут по его стабильному нуклиду):

$$m = C \cdot V,$$

где  $m$ - масса стабильного нуклида;

$C$ -концентрация стабильного нуклида в ЖРО (солесодержание);

V- общий объем очищаемой ЖРО.

$$m = C \cdot V = 3 \text{ кг/м}^3 \cdot 1500 \text{ м}^3 = 4500 \text{ кг (4,5 т.)}$$

2. По рассчитанной массе (m) радионуклида определим объем сорбента для очистки:

$$V_m = \frac{m}{\text{ДОЕ}},$$

где  $V_m$  – объем сорбента для очистки ЖРО;

m – масса сорбента;

ДОЕ – динамическая емкость сорбента по извлекаемому радионуклиду.

Масса m(кг) переводится (кг-экв):

$$M_{\text{ВCo}} = 60 \text{ г/моль}; M_{\text{ВCl}} = 35 \text{ г/моль}$$

$$M (\text{CoCl}_3) = 60 + 35 = 95 \text{ г/моль}$$

$$1 \text{ кг-экв} (\text{CoCl}_3) = \frac{M (\text{CoCl}_3)}{n \cdot \Pi} = \frac{95 \cdot 3}{2} = 142,5 \text{ кг-экв}$$

1 кг-экв содержится в 142,5 кг  $\text{CoCl}_3$

X содержится в 4500 кг  $\text{CoCl}_3$ , следовательно:

$$X = \frac{4500}{142,5} = 31,6 \text{ кг-экв}$$

$$V_m = \frac{31,6 \text{ кг - экв}}{8,9 \text{ кг - экв/ м}^3} = 3,6 \text{ м}^3$$

3. Определяем необходимый объем сорбента с учетом степени использования обменной емкости сорбента:

$$V_H = \frac{V_m}{k_c},$$

где  $V_H$  – необходимый объем сорбента;

$V_m$  – объем сорбента;

$k_c$  – степень использования обменной емкости.

$$V_H = \frac{3,6}{0,5} = 7,2 \text{ м}^3$$

4. Определяем эффективную площадь фильтрования фильтра:

$$S = \frac{Q}{q},$$

где  $S$  – площадь фильтрования фильтра,  $\text{м}^2$ ;

$Q$  – максимальная производительность фильтра;

$q$  – удельная производительность.

$$S = \frac{48 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}}{10 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2} \cdot \text{час}} = 4,8 \text{ м}^2$$

5. Определяем диаметр фильтра:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}},$$

где  $d$ - диаметр фильтра,  $\text{м}$ ;

$S$  – площадь фильтрования фильтра;

$\pi = 3,14$ .

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,8}{3,14}} = 2,5 \text{ м}$$

6. Определяем высоту фильтра:

$$H_{\phi} = \frac{1,25 \cdot V_{\text{н}}}{S},$$

где  $H_{\phi}$ – высота фильтра;

1,25- коэффициент загрузки;

$V_{\text{н}}$  – необходимый объем сорбента;

$S$  – площадь фильтрования фильтра.

$$H_{\phi} = \frac{1,25 \cdot 7,2 \text{ м}^3}{4,8 \text{ м}^2} = 1,875 \text{ м}$$

7. Рассчитаем объем набухшего ионита:

$$V_{\text{с.н.}} = V_{\text{н}} \cdot k_{\text{н}},$$

где  $V_{с.н.}$  – объем набухшего сорбента;

$V_H$  – необходимый объем сорбента;

$k_H$  – коэффициент набухания.

$$V_{с.н.} = 7,2 \text{ м}^3 \cdot 1,13 = 8,136 \text{ м}^3$$

8. Выбор промышленного фильтра из таблицы:

АФИ-2, 0-10,  $d=2,5$  м,  $Q=50\text{м}^3$ ;  $H_f=2$  м

9. Определим массу загрузки ионита:

$$m_{\phi} = V_H \cdot M_H,$$

где  $m_{\phi}$  - масса загрузки ионита;

$V_H$  - необходимый объем сорбента;

$M_H$  - насыпная масса сорбента.

$$m_{\phi} = 7,2 \text{ м}^3 \cdot 0,75 \text{ т/м}^3 = 5,4 \text{ т.}$$

10. Определим количество промышленных фильтров, необходимых для очистки необходимого количество ЖРО:

$$n = \frac{V_{с.н.}}{V_N},$$

где  $n$  – количество промышленных фильтров;

$V_{с.н.}$  – объем набухшего ионита;

$V_N$  – объем загрузки промышленного фильтра.

Объем загрузки промышленного фильтра:

$$V_N = d \cdot h = 2,5 \cdot 1,875 = 4,69 \text{ м}^3$$

$$n = 8,136 \text{ м}^3 / 7,2 \text{ м}^3 = 1,13$$

(Количество фильтров принимается в количестве 2).

11. Определим время работы фильтров:

$$T = \frac{V_H \cdot \text{ДОЕ}}{Q \cdot C},$$

где  $T$ - время работы фильтров;

$V_H$ - необходимый объем сорбента;

ДОЕ- динамическая емкость сорбента по извлекаемому радионуклиду;

$Q$  - максимальная производительность фильтра.

$$T = \frac{7,2 \text{ м}^3 \cdot 8,9 \text{ кг-ЭКВ/ м}^3}{48 \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \cdot \left( \frac{5 \text{ кг/ м}^3}{142,5 \text{ кг-ЭКВ/ м}^3} \right)} = 38,1$$

## 12. Графическое построение технологической схемы очистки ЖРО:

Высота рассчитанного фильтра ( $H_\Phi$ ) составляет 1,875 м, диаметр рассчитанного фильтра( $d$ ) равен 2,5 м , а промышленный фильтр имеет загрузку шихты 2 м , и диаметр 2,5 м .Выбранные промышленные фильтры (2 шт.) собираются в технологическую схему из 2 параллельных ступеней (рисунок 1).

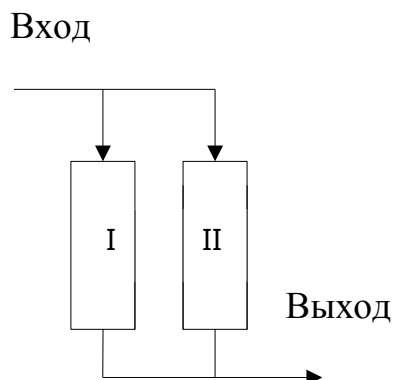


Рисунок 1 - Схема технологическая из трех ступеней

## 3.2 Расчёт двухкорпусной выпарной установки

### Исходные данные:

1. Начальная концентрация раствора -  $b_H = 15 \%$
2. Конечная концентрация раствора -  $b_{\text{кон}} = 85 \%$
3. Производительность по сиропу -  $G_{\text{кон}} = 720 \text{ кг/ч}$  (0,2 кг/с)
4. Давление греющего пара -  $P_0 = 0,35 \text{ Мпа}$

5. Температура насыщения –  $t = 155 \text{ }^\circ\text{C}$
6. Давление и температура вторичного пара во втором корпусе  $P_2 = 0,07 \text{ Мпа}$ ,  
 $= 90 \text{ }^\circ\text{C}$
7. Отбор вторичного пара из I корпуса =  $0,13 \text{ кг/кг}$  раств. (используется для подогрева раствора в подогревателе П1)
8. Коэффициенты теплопередачи: - в I корпусе  $K = 800 \text{ Вт/м}^2\text{С}$ , во II корпусе  $K_2 = 400 \text{ Вт/м}^2\text{С}$ .

Решение:

Исходя из исходных и справочных данных:

1. Определим количество раствора, поступающего в первый корпус:

$$G_H = G_K \frac{b_k}{b_H} = 720 \frac{85}{15} = 4080 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 1,13 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

2. Определим количество воды, подлежащее выпарке:

$$W = G_H - G_K = 4080 - 720 = 3360 \text{ кг/ч} = 0,93 \text{ кг/с}$$

3. Определим количества выпаренной воды на 1 кг раствора начальной концентрации:

$$\omega = W/G_H = 3360/4080 = 0,66 \text{ кг/ч раствора.}$$

4. Примем в первом приближении, что количество воды, выпаренной во II корпусе, равно количеству поступающего в него вторичного пара из I корпуса:

$\omega_1 - \varepsilon_1 \approx \omega_2$ , а поскольку  $\omega_2 = \omega - \omega_1$ , то имеем  $\omega_1 - \varepsilon_1 = \omega - \omega_1$  откуда находим:

$$2 \omega_1 = \omega + \varepsilon_1.$$

Отсюда следует, что:  $\omega_1 = \frac{\omega + \varepsilon_1}{2} = \frac{0,82 + 0,1}{2} = 0,46 \text{ кг/кг}$

Определяем  $\omega_2$ :  $\omega_2 = \omega - \omega_1 = 0,82 - 0,46 = 0,36 \text{ кг/кг}$ .

5. Концентрация раствора в корпусах:



$$b_1 = \frac{b_H}{1 - w_1} = \frac{15}{1 - 0,46} = 27,78 \%$$

$$b_2 = \frac{b_H}{1 - (\omega_1 + \omega_2)} = \frac{15}{1 - (0,46 + 0,36)} = 83,33 \%$$

6. Определим теплоемкости раствора:

$$C_{\text{раствора}} = \frac{C_c \cdot b + C_B \cdot (100 - b)}{100},$$

где:  $C_c$ - теплоемкость сухого вещества,

$C_B$ - теплоемкость воды.

Получаем следующие значения:

$$C_0 = \frac{880 \cdot 15 + 4200 (100 - 15)}{100} = 3702 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C} = 3,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_1 = \frac{880 \cdot 27,78 + 4200 (100 - 27,78)}{100} = 3278 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C} = 3,28 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_2 = \frac{880 \cdot 83,33 + 4200 (100 - 83,33)}{100} = 1433 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C} = 1,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C}$$

7. Определим температуры во всех корпусах:

7.1 Располагаемый температурный напор:

$$\Delta t_p = t_1' - t_2'' = 155 - 90 = 65^\circ\text{C}$$

7.2 Полезный температурный напор:

$$\Delta t = \Delta t_p - \sum_{i=1}^2 (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3)_i,$$

где  $(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3)$  – сумма температурных депрессий для  $i$ -го корпуса.

Для каждого корпуса депрессии определим по справочным данным в зависимости от концентрации раствора. Справочные данные приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Справочные данные

Название депрессии	I корпус	II корпус	Общая
--------------------	----------	-----------	-------

Физико-химическая $\Delta_1$	1	10	14,5
Гидравлическая $\Delta_2$	0,5	1	2,2
Гидростатическая $\Delta_3$	0,7	1,5	2,2
Суммарная ( $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ )	2,2 °C	13,5 °C	18,9 °C

Полезный температурный напор:  $\Delta t = 65 - 18,9 = 46,1$  °C

8. Распределение полезного температурного напора по корпусам:  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 46,1$  °C, при равных поверхностях справедлива формула:  $\Delta t_2 / \Delta t_1 = (Q_2 / Q_1) \cdot (K_1 / K_2)$ .

Отношение тепловых мощностей:  $(Q_2 / Q_1) \approx (\omega_2 / \omega_1) = 0,36 / 0,46 = 0,783$ .

Отношение коэффициентов теплопередачи в корпусах:  $K_1 / K_2 = 800 / 400 = 2$   
 $\Delta t_2 / \Delta t_1 = 0,783 \cdot 2 = 1,57$ .

Таким образом, выражаем температурный напор во втором корпусе выпарной установки через напор в первом:  $\Delta t_2 = 1,57 \Delta t_1$ . Отсюда получим  $\Delta t_1 \cdot (1 + 1,57) = 46,1$  °C, и, следовательно,  $\Delta t_1 = \frac{46,1}{1,57} = 29,4$  °C,  $\Delta t_2 = 1,57 \cdot 29,4 = 46,2$  °C.

Зная температурные напоры и температурные депрессии, определим неизвестные температуры раствора и экстрапара в корпусах:

$$t_1 = t_1' - \Delta t_1 = 155 - 29,4 = 125,6 \text{ °C};$$

$$t_1'' = t_1 - \Delta_{1k} = 125,6 - 2,2 = 123,4 \text{ °C};$$

$$t_2 = t_2'' + \Delta_{2k} = 90 + 13,5 = 103,5 \text{ °C}.$$

Все расчетные и табличные значения температур и энтальпий сведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Расчетные и табличные значения температур и энтальпий

Величины	I корпус	II корпус
Температуры, °C		
греющего пара	$t_1' = 155$	$t_2' = t_1'' = 123,4$
вторичного пара	$t_1'' = 123,4$	$t_2'' = 90$
Раствора	$t_1 = 125,6$	$t_2 = 103,5$
Конденсата	$\tau_1 = 155$	$\tau_2 = 135,85$
Энтальпии, кДж/кг		
греющего пара	$i_1' = 2714$	$i_2' = i_1'' = 2690$

Величины	I корпус	II корпус
вторичного пара	$i_1''=2690$	$i_2''=2680$
теплота конденсации греющего пара	$r_0=2186$	$r_1=2232$

9. Расход греющего пара:

$$d_1 = \frac{0,82 - 3,7 \cdot 0,0112 + 0,1}{2} = 0,34 \text{ кг пара / кг раствора}$$

Полный расход пара:  $D_1 = G_{\text{нач}} d_1 = 4080 \cdot 0,34 = 1387 \text{ кг/ч} = 0,385 \text{ кг/с}$

Рассчитаем  $\beta_1$  и  $\beta_2$ :

$$\beta_1 = \frac{t_0 - t_1}{i_1 - \{C\} r_{\text{sub}} \{B\} \{t\} r_{\text{sub}} \{1\}} = \frac{155 - 125,6}{2690 - 4,2 \cdot 125,6} = 0,0136$$

$$\beta_2 = \frac{t_1 - t_2}{i_2 - \{C\} r_{\text{sub}} \{B\} \{t\} r_{\text{sub}} \{2\}} = \frac{125,6 - 103,5}{2680 - 4,2 \cdot 103,5} = 0,0071$$

10. Определим количество выпаренной воды, кг раствора:

в I корпусе:  $\omega_1 = d_1 + C_0 \cdot \beta_1 = 0,34 + 3,7 \cdot 0,0136 = 0,39$

во II корпусе:  $\omega_2 = \omega_1 - (\omega_1 \cdot C_v \cdot \beta_2) + (C_0 \cdot \beta_2) - \varepsilon_1$

$$\omega_2 = 0,39 - (0,39 \cdot 4,2 \cdot 0,0071) + (3,7 \cdot 0,0071) - 0,1 = 0,304$$

Общее количество выпаренной воды равно:

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 = 0,39 + 0,304 = 0,694$$

Т.е. почти столько, сколько и было вначале принято ( $\omega = 0,66$ ), следовательно, общее количество влаги не изменится  $W = 3360 \text{ кг/ч}$ .

11. Концентрация раствора по корпусам:

$$b_2 = b_0 / (1 - \omega) = 15 / (1 - 0,66) = 44,12 \%$$

$$b_1 = b_0 / (1 - \omega_1) = 15 / (1 - 0,39) = 24,59 \%$$

12. Расчет тепловых мощностей:

I корпуса:  $Q_1 = D_1 \cdot r_0 = 0,38 \cdot 2186 = 315,66 \text{ кВт}$ ;

II корпуса:  $Q_2 = (\omega_1 - \varepsilon_1) G_{\text{нач}} \cdot r_1 = (0,39 - 0,1) \cdot 1,13 \cdot 2232 = 731,43 \text{ кВт}$

13. Расчет поверхностей нагрева в корпусах:

$$F_1 = Q_1 / (K_1 \cdot \Delta t_1) = 315,66 \cdot 10^3 / (800 \cdot 29,4) = 13,42 \text{ м}^2$$

$$F_2 = Q_2 / (K_2 \cdot \Delta t_2) = 731,43 \cdot 10^3 / (400 \cdot 46,2) = 39,57 \text{ м}^2$$

Получились почти равные поверхности нагрева, что и было задано по условию.

## 4 ВЫБОР МЕТОДА ОТВЕРЖДЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

### 4.1 Битумирование как один из способов отверждения жидких радиоактивных отходов

Битумирование. Представляет собой один из перспективных способов отверждения, уже применяемый во многих странах. Внедрению процесса битумирования предшествовали работы по изучению влияния состава отходов на процесс и свойства конечного продукта, уточненные в процессе работы опытных установок. Это дало возможность определить оптимальные условия проведения процесса: исключить возникновение экзотермической реакции между нитратом натрия и битумом (температура взаимодействия не выше 350 °С) и возгорание битума (возможно лишь при создании сильного теплового воздействия, приводящего к разогреву выше температуры самовоспламенения, т.е. выше 350 °С). Битум благодаря своей термопластичности позволяет при нагревании успешно включать в себя концентраты с получением гомогенного продукта. Гидростойкость битума обеспечивает довольно надежную гидроизоляцию включенных компонентов. Отмечается также меньшая чувствительность битума к составу отверждаемого продукта, чем у связующих, включение отходов в которые возможно при комнатной температуре. Также битумы привлекают внимание такими положительными качествами, как непроницаемость, пластичность, достаточная химическая инертность, невысокая стоимость. Предельные величины включения отходов зависят от их состава. Ограничивается степень включения гигроскопичных соединений – ионообменных смол (не более 20÷30 %), кристаллогидратов (например, тетрабората натрия не более 20 %). Фильтроматериалы типа перлита, датолита при включении в битум более 10 % приводят к затверждению битума. Однако общую степень включения в битум можно увеличить до 40÷50 % введением в смесь солевого

наполнителя, например нитрата или сульфата натрия. Не рекомендуется подвергать битумированию кислые растворы с большим содержанием нитратов железа и алюминия, которые могут окислить битум, изменяя его термопластические свойства. При битумировании сильнощелочных растворов со значением рН более 12 может происходить омыление органических соединений, входящих в состав битума, что уменьшает его водоустойчивость. Исследования влияния радиации на свойства битумированных отходов показали, что при мощности дозы  $\gamma$ -излучения не более 0,1 Гр/с отсутствует разложение битума, не изменяется фракционный состав и не наблюдается газовыделение при хранении.

В процессе проведенных опытно-промышленных испытаний по обращению с низкоактивными и среднеактивными ЖРО в настоящее время применяется три основных типа установок по битумированию ЖРО:

**1. Шнековый смеситель (экструдер)** с обогревом паром или органическим теплоносителем, в который непрерывно подаются битум и отходы и непрерывно выгружается готовый продукт. Аппарат не предназначен для упаривания пенящихся растворов и имеет недостаточно развитую греющую поверхность. Шнековый смеситель рационально использовать для предварительного обезвоживания отходов или пульп.

**2. Пленочный роторный испаритель** позволяет в одном аппарате осуществлять удаление влаги и битумирование. Теплоносителем служит греющий пар, который имеет ограниченные температурные параметры и не допускает температуру внутри аппарата выше 230÷240 °С.

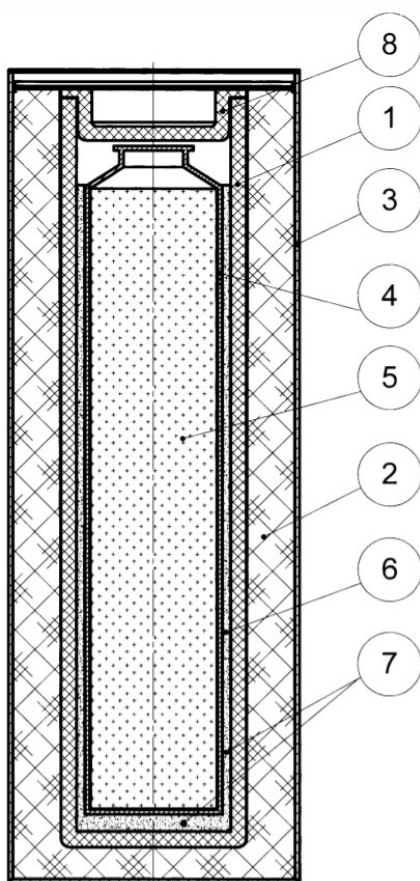
**3. Установки периодического действия** с внутренними

электронагревателями, в котором на порцию горячего битума подаются при постоянном перемешивании механической мешалкой отходы. Недостатки аппарата – малая производительность (не более 70 л/ч), возможность отложения битумных солевых наростов на стенках аппарата, электроподогрев, не исключающий перегрев свыше температуры 200 °С. Конечные операции на всех установках битумирования одинаковы: затаривание битумной массы, хранение или захоронение контейнеров с продуктами. Для захоронения радиоактивных отходов используют искусственные битумы, получаемые окислением гудрона или других продуктов перегонки нефти кислородом. К недостаткам данного метода можно отнести неустойчивость битумных блоков при температуре свыше 350 °С. Увеличение содержания солей в битумной смеси может вызвать ее расслаивание в разогретом состоянии при транспортировке или в начальном периоде хранения. Это может привести к разрушению битумных блоков и высвобождению хранящихся в них радионуклидов.

## **1.2 Выбор контейнера для хранения радиоактивных отходов**

Предложенный контейнер для хранения, транспортировки и захоронения радиоактивных отходов. Обеспечивает повышение прочности и надежности для хранения и захоронения радиоактивных отходов, а также защиту окружающей среды от радиоактивного излучения. Порошок карбида бора,

размещенный в зазоре между канистрой с ВАО и внутренней поверхностью пенала из карбида кремния, а также размещенный в слое пеноалюминия, обеспечивает снижение интенсивности радиационного излучения до фоновых значений. Краткое описание чертежа На фигуре 1 представлен чертеж контейнера для хранения, транспортировки и захоронения особотоксичных отходов, таких как радиоактивные отходы АЭС, атомных судовморскогофлота, токсичныхматериалов химических производств и других вредных производственных отходов.



1 - пенал из реакционноспеченного карбида кремния; 2 - слой из пенометалла с сообщающимися порами и пористостью 60-70%, поры которого заполнены порошком карбида бора; 3 - металлическая обечайка; 4 - стальная канистра, заполненная высокоактивными отходами; 5 - высокоактивные отходы; 6 - зазор между канистрой и внутренней поверхностью пенала; 7 - засыпка из порошка карбида бора; 8 - крышка пенала из реакционноспеченного карбида кремния, приваренная к пеналу методом реакционной сварки.



Целью данного изобретения является повышение прочности контейнера для твердых радиоактивных отходов и его надежности, а также защита окружающей среды от радиационного излучения ВАО. Поставленная цель достигается тем, что наружный слой пенала из реакционно спеченного карбида кремния, содержащего свободный кремний в количестве 3-30% масс, на поверхности которого нанесен слой газофазного карбида кремния, выполнен из пенометалла (пеноалюминия, пенотитана, пеномеди и др.) в частном случае из пеноалюминия с пористостью 60-70%, размером пор 5-6 мм, в поры засыпан порошок В4С дисперсностью 40-50 мкм, являющийся защитой окружающей среды от радиационного излучения, исходящего от ВАО. Причинно-следственная связь между достижением поставленной цели и отличительными признаками изобретения заключается в следующем.

Для снижения силы удара до значений, обеспечивающих сохранение целостности пенала из карбида кремния при возможном ударе при проведении технологических операций (загрузки отходов, перемещении контейнера при его загрузке в транспортный контейнер и других действий), наружный слой контейнера выполнен из пенометалла с открытой пористостью 50-60%, размером пор 5-6 мм, поры заполнены порошком карбида бора дисперсностью 40-50 мкм, являющимся защитой окружающей среды от радиационного излучения, исходящего от ВАО. Для снижения остаточных напряжений в пенале из карбида кремния исключается контакт расплавленных остеклованных высокоактивных отходов со стенкой пенала из карбида кремния, для чего остеклованные расплавленные высокоактивные отходы заливаются в стальную канистру, размещенную в пенале из карбида кремния с зазором между стенкой канистры и пенала 5 мм, в который засыпается порошок карбида бора дисперсностью 100-150 мкм. Параметры наружного слоя (толщина пеноалюминия, защищающего пенал от разрушения, его пористость, размер пор, количество размещаемого в порах порошка) зависят от размера пенала и его веса. Определение этих параметров проводилось математическими методами, все расчеты выполнены в

программе ANSYS. В качестве исходных данных были взяты вес контейнера 170 кг, прочность материала пенала 270 МПа, напряжения в пенале при падении с высоты 1,2 м не должны превышать 20-25 МПа. При этих условиях результаты расчета следующие: толщина слоя из пеноалюминия с пористостью 60-70%, величиной пор 5-6 мм составляет 110 мм.

Предлагаемая конструкция реализуется следующим образом. Пенал из реакционноспеченного карбида кремния изготавливается по следующей технологии. Из шихты необходимой рецептуры методом гидростатического прессования прессуется заготовка с требуемой геометрией, затем проводятся термические операции - полимеризация при  $T=150^{\circ}\text{C}$ , карбонизация при  $T=900^{\circ}\text{C}$ , силицирование при  $T=1500^{\circ}\text{C}$ , в результате чего получается пенал из карбида кремния с содержанием свободного кремния 3-30% масс. После пескоструйной обработки на внешнюю поверхность пенала наносится слой карбида кремния газофазным методом. На полученной таким образом внешней поверхности пенала размещается слой пенометалла толщиной 110 мм (пеноалюминий, пенотитан, пеномедь и др.), поверх пенометалла размещается обечайка из стали толщиной 1,5 мм. Поры пенометалла заполняются порошком В4С дисперсностью 40-50 мкм.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе были рассмотрены понятие о радиоактивных отходах и критерии их определения, классификация и характеристика РАО, основные методы их очистки и утилизации. Проведены расчеты технологического оборудования для переработки жидких РАО на примере ионообменного фильтра с кипящим слоем ионита и двухкорпусной выпарной установки для получения солевого сплава. Выбран метода отверждения жидких радиоактивных отходов, изучено его аппаратное оформление. Выбран контейнер для дальнейшего хранения РАО.

Исходя из принятых международных обязательств Российской Федерации, действующей законодательной и нормативной базы, стратегия обращения с РАО в Российской Федерации направлена на решение задач по вновь образующимся РАО и РАО наследия. Создание эффективной системы безопасного обращения с радиоактивными отходами является принципиальным условием дальнейшего развития атомной энергетики и промышленности. Создание такой системы позволит обеспечить повышение безопасности обращения с радиоактивными материалами на всех этапах их жизненного цикла.

Кроме того, благодаря исключению стадии длительного хранения отходов значительно повышается экономическая эффективность всего заключительного этапа обращения с РАО.



**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Русяева К.А. «Обращение с радиоактивными отходами на АЭС», Москва, 2017.
2. В.В. Гафаров, Т.А. Кулагина, «Безопасные методы утилизации радиоактивных отходов», Красноярск, стр. 585.
3. Учебное пособие В.А.Ерофеев «Основы обращения с РАО» СНУЯЭиП, стр. 71-85.
4. Ключников А.А. и другие. «РАО АЭС и методы обращения с ними», 2005г. Киев. 2005г стр. 225 – 241
5. Нормы радиационной безопасности НРБ – 99/2009
6. Бабаянц Г.И., Бабаянц К.Г., Шарыкин О.В., «Контейнер для хранения, транспортирования и захоронения радиоактивных отходов», Москва, 2020г стр. 2-7.
7. Радиоактивные отходы // Википедия. [2021]. Дата обновления: 16.12.2021. URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=186183&oldid=118676856> (дата обращения: 16.12.2021).