

7. ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

7.1. Общая характеристика отходов радиохимического производства

Регенерация ценных компонентов из облученного топлива сопровождается образованием водных и органических растворов, газов и аэрозолей, твердых веществ и пыли, содержащих различные количества осколочных и трансурановых элементов и представляющих собой отходы радиохимического производства. Типичный радиохимический состав отработавшего ядерного топлива приведен в табл. 1.2-1.5 и табл. 7.1. Все входящие в состав ОЯТ продукты деления и актиноидные элементы в разных комбинациях переходят в разные виды радиоактивных отходов. Предотвращение попадания в окружающую среду этих радионуклидов – безусловное требование, которому должно удовлетворять радиохимическое производство.

Образующиеся в процессе переработки ядерного топлива радиоактивные отходы весьма разнообразны не только по агрегатному состоянию, но и по уровню активности и по преимущественному содержанию в них определенных радионуклидов. Чтобы выработать принципы обращения с разными типами отходов, необходимы их **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ.**

Таблица 7.1. Изменение состава топлива легководного реактора в результате облучения

Состав топлива до облучения в реакторе	Количество выгоревшего топлива	Состав облученного топлива
^{238}U 967 кг	^{238}U 24 кг	^{238}U 943 кг
^{235}U 33кг	^{235}U 25кг	^{235}U 8кг
		^{236}U 4,6 кг
		Изотопы плутония 8,9 кг
		^{237}Np 0,5 кг
		^{243}Am 0,12 кг
		^{244}Cm 0,04 кг
		Осколочные нуклиды 35 кг
Всего 1000 кг Обогащение 3,3 %	Всего 49 кг	

Обычно РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ ПРИНЯТО ПОДРАЗДЕЛЯТЬ ПО АГРЕГАТНОМУ СОСТОЯНИЮ НА ГАЗООБРАЗНЫЕ, ЖИДКИЕ И ТВЕРДЫЕ, а ПО УРОВНЮ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ – НА ВЫСОКОАКТИВНЫЕ (ВАО), СРЕДНЕАКТИВНЫЕ (САО) И НИЗКОАКТИВНЫЕ (НАО). Для систематизации отходов используют также и другие признаки. Например, ЖИДКИЕ ОТХОДЫ ДЕЛЯТ НА ВОДНЫЕ И ОРГАНИЧЕСКИЕ, ВЫСОКО ЗАСОЛЕННЫЕ И НИЗКО ЗАСОЛЕННЫЕ, ТРИТИЙСОДЕРЖАЩИЕ И ДР.; в составе газовых отходов выделяют газы и аэрозоли; из твердых отходов выделяют сжигаемые и несжигаемые, прессуемые и т.п. Большую группу твердых отходов составляют разнообразные материалы, загрязненные плутонием и/или другими трансурановыми элементами. Эти отходы обычно называют "трансурановыми" или "альфа"-отходами.

В зависимости от категории отходов предусматриваются РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ОБРАЩЕНИЯ с ними. ПОД СПОСОБОМ ОБРАЩЕНИЯ имеют в виду МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЛИ ПЕРЕРАБОТКИ, А ТАКЖЕ СПОСОБЫ И УСЛОВИЯ ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ.

Уровень удельной активности, определяющий отнесение отходов к той или иной категории, является условным, и границы между ВАО, САО и НАО в разных странах часто не одинаковы. В России к жидким ВАО относят отходы с удельной β -активностью выше $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/дм³, имеющие высокое тепловыделение и сохраняющие уровень активности и тепловыделения продолжительный период времени. Эти отходы требуют при хранении защиты и охлаждения. Жидкие САО имеют удельную β -активность от $3,7 \cdot 10^5$ до $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/дм³ и могут иметь невысокую α -активность. При хранении их необходима защита, но не требуется охлаждения. НАО – с удельной β -активностью $37-3,7 \cdot 10^5$ Бк/дм³. Их хранение не требует ни охлаждения, ни защиты. Эта **КЛАССИФИКАЦИЯ** близка к рекомендациям **МАГАТЭ**, согласно которым **ЖИДКИЕ ОТХОДЫ ПО УРОВНЮ АКТИВНОСТИ ПОДРАЗДЕЛЯЮТ НА ПЯТЬ КАТЕГОРИЙ** (табл. 7.2).

ТВЕРДЫЕ ОТХОДЫ МАГАТЭ РЕКОМЕНДУЕТ КЛАССИФИЦИРОВАТЬ ПО ЧЕТЫРЕМ КАТЕГОРИЯМ, в трех из которых допускается содержание незначительного количества α -излучателей, а одна включает в основном α -излучатели (табл. 7.3).

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Таблица 7.2. Классификация жидких отходов по рекомендациям МАГАТЭ

Категория	Удельная активность A , Бк/см ³	Примечание	
1	$A \leq 0,37$	Не перерабатывают	
2	$0,37 < A \leq 37$	Без защиты	перерабатывают
3	$37 < A \leq 3,7 \cdot 10^3$	Защита возможна	
4	$3,7 \cdot 10^3 < A \leq 3,7 \cdot 10^8$	Защита необходима	
5	$3,7 \cdot 10^8 < A$	Необходимы охлаждение и переработка	

Таблица 7.3. Классификация твердых отходов

Категория	Мощность дозы P на поверхности отходов, А/кг (Р/ч)	Примечание
1	$P \leq 1,5 \cdot 10^{-7}$ (0,2)	β -, γ -излучатель, содержание α - излучателей незначительно
2	$1,5 \cdot 10^{-7}$ (0,2) $< P \leq 1,5 \cdot 10^{-6}$ (2)	
3	$1,5 \cdot 10^{-6}$ (2) $< P$	
4	α -Активность, Бк/м ³	В основном α - излучатели

ГАЗОВЫЕ ОТХОДЫ КЛАССИФИЦИРУЮТ ПО ТРЕМ КАТЕГОРИЯМ: с удельной активностью меньше $3,7 \text{ Бк/м}^3$, от $3,7$ до $3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3$ и свыше $3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3$.

Количество и состав образующихся газовых, жидких и твердых отходов зависят от характеристик отработавшего ядерного топлива и применяемой технологии регенерации. Так, при экстракционной переработке уранового оксидного топлива легководного реактора с глубиной выгорания $33 \text{ ГВт}\cdot\text{сут/т}$ и выдержкой в течение 1 года на 1 т облученного топлива образуется $0,4 \text{ т}$ оболочек и конструктивных элементов ТВС с активностью около $6,3 \cdot 10^{14} \text{ Бк}$, $500\text{-}1200 \text{ дм}^3$ концентратов жидких высокоактивных отходов с суммарной активностью $3,7 \cdot 10^{16} \text{ Бк}$, газовые отходы, активность которых составляет около 1 % первоначальной активности топлива, и, наконец, около 60 м^3 низко- и среднеактивных отходов, содержащих до 1 % исходного количества радиоактивных элементов.

В табл. 7.4 приведены рассчитанные количества отходов наиболее опасных категорий, которые будут образовываться в течение года на радиохимическом заводе производительностью 1400 т/год , при условии, что криптон выделяется из газообразных отходов, ВАО остекловываются, НАО и САО подвергаются упарке и битумированию.

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Таблица 7.4. Годовые объемы отходов завода производительностью 1400 т/год (топливо с глубиной выгорания 33 ГВт·сут/т, время выдержки 1 год)

Категория отходов	Объем, масса или активность	Объем, масса или активность концентрата после переработки, м ³
Остеклованные ВАО	–	140
Жидкие САО	26 000 м ³	2000
Жидкие НАО	60 000 м ³	1200
⁸⁵ Kr	140 м ³ ; 5,5·10 ¹⁷ Бк (15 МКи) (при нормальных условиях)	3 (в 50 дм ³ баллонах)
¹²⁹ I	390 кг; 2·10 ¹² Бк (55 Ки)	
Тритий	0,8 м ³ ; 3,7·10 ¹⁶ Бк (1 МКи)	
Твердые отходы		3500 (из них 310 оболочек)

7.2. Основные пути решения проблемы обращения с радиоактивными отходами

Надежная долговременная изоляция радиоактивных отходов от биосферы является важной проблемой, от решения которой, в конечном счете, зависит осуществление планов развития ядерной энергетики. Наибольшее внимание из-за серьезной опасности для жизни на Земле уделяется **ВОПРОСАМ, СВЯЗАННЫМ С РАЗРАБОТКОЙ МЕТОДОВ ОБРАЩЕНИЯ С ВЫСОКОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ**, в которых **СОСРЕДОТОЧЕНО БОЛЕЕ 99 % АКТИВНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ТВЭЛов**. Активность многих осколочных нуклидов сохраняется в течение сотен лет, а активность трансураниевых и некоторых осколочных нуклидов, таких, как ^{129}I , ^{14}C , ^{99}Tc , – в течение сотен тысяч лет (табл. 7.5 и 7.6). Снижение уровня суммарной энергии γ -излучения высокоактивных отходов, начиная с момента выгрузки из реактора, иллюстрирует рис. 7.1. Отдельные тонкие кривые отвечают вкладу наиболее важных радионуклидов, а огибающая кривая показывает суммарную энергию γ -излучения, испускаемого в секунду различными нуклидами.

В последние годы начато серьезное изучение экологической опасности таких радионуклидов, как $^3\text{T}_1$, ^{14}C , ^{129}I , в глобальном, региональном и локальном масштабе. Ясно, что вред от этих радионуклидов, проникающих в жизненно важные органы человека, не может быть оценен лишь на основе создаваемой ими дозовой нагрузки.

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Таблица 7.5. Активность важнейших долгоживущих продуктов деления в жидких ВАО (с учетом равновесия с дочерними продуктами), полученных при переработке облученного в течение 1 года топлива легководного реактора мощностью 1000 МВт

Изотоп	$T_{1/2}$	Активность, Бк (Ки), по истечению			
		1 года	10 лет	100 лет	1000 лет
^{90}Sr	29 лет	$7,4 \cdot 10^{16}$ ($2 \cdot 10^6$)	$5,9 \cdot 10^{16}$ ($1,6 \cdot 10^6$)	$6,3 \cdot 10^{15}$ ($1,7 \cdot 10^5$)	$3,7 \cdot 10^7$ (10^{-3})
^{90}Y	2,6 сут	$7,4 \cdot 10^{16}$ ($2 \cdot 10^6$)	$5,9 \cdot 10^{16}$ ($1,6 \cdot 10^6$)	$6,3 \cdot 10^{15}$ ($1,7 \cdot 10^5$)	–
^{93}Zr	$9,5 \cdot 10^5$ лет	$1,85 \cdot 10^{12}$ (50)	$1,85 \cdot 10^{12}$ (50)	$1,85 \cdot 10^{12}$ (50)	$1,85 \cdot 10^{12}$ (50)
^{93}Nb	12 лет	$2,2 \cdot 10^{11}$ (6)	$8,5 \cdot 10^{11}$ (23)	$1,85 \cdot 10^{12}$ (50)	$1,85 \cdot 10^{12}$ (50)
^{99}Tc	$2,13 \cdot 10^5$ лет	$1,4 \cdot 10^{13}$ (380)	$1,4 \cdot 10^{13}$ (380)	$1,4 \cdot 10^{13}$ (380)	$1,4 \cdot 10^{13}$ (380)
^{106}Ru	369 сут	$2,6 \cdot 10^{17}$ ($7 \cdot 10^6$)	$5,2 \cdot 10^{14}$ ($1,4 \cdot 10^4$)	–	–
^{106}Rh	30 с	$2,6 \cdot 10^{17}$ ($7 \cdot 10^6$)	$5,2 \cdot 10^{14}$ ($1,4 \cdot 10^4$)	–	–
^{134}Cs	2,3 года	$1,7 \cdot 10^{17}$ ($4,7 \cdot 10^6$)	$8,1 \cdot 10^{15}$ ($2,2 \cdot 10^5$)	–	–
^{137}Cs	30 лет	10^{17} ($2,7 \cdot 10^6$)	$8,5 \cdot 10^{16}$ ($2,3 \cdot 10^6$)	10^{16} ($2,8 \cdot 10^5$)	–
^{144}Ce	284 сут	$4,4 \cdot 10^{17}$ ($1,2 \cdot 10^7$)	$1,5 \cdot 10^{14}$ ($4 \cdot 10^3$)	–	–
^{144}Pr	17 мин	$4,4 \cdot 10^{17}$ ($1,2 \cdot 10^7$)	$1,5 \cdot 10^{14}$ ($4 \cdot 10^3$)	–	–
^{151}Sm	93 года	$1,2 \cdot 10^{15}$ ($3,3 \cdot 10^4$)	$1,1 \cdot 10^{15}$ ($3,1 \cdot 10^4$)	$5,5 \cdot 10^{14}$ ($1,5 \cdot 10^4$)	–

Таблица 7.6. Активность трансурановых элементов в жидких ВАО (с учетом равновесия с дочерними изотопами), полученных при переработке облученного в течение 1 года топлива легководного реактора мощностью 1000 МВт

Изотоп	$T_{1/2}$	Активность, Бк (Ки), по истечении				
		10 лет	100 лет	10^3 лет	10^4 лет	10^6 лет
^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$ лет	$3,4 \cdot 10^{11}$ (9,1)	$3,4 \cdot 10^{11}$ (9,2)	$3,6 \cdot 10^{11}$ (9,8)	$3,7 \cdot 10^{11}$ (10)	$2,7 \cdot 10^{11}$ (7,3)
^{239}Np	2,34 сут	$1,8 \cdot 10^{13}$ (480)	$1,8 \cdot 10^{13}$ (480)	$1,6 \cdot 10^{13}$ (440)	$7,4 \cdot 10^{12}$ (200)	–
^{238}Pu	87,8 года	$9 \cdot 10^{13}$ ($2,5 \cdot 10^3$)	$4,8 \cdot 10^{13}$ ($1,3 \cdot 10^3$)	$2,2 \cdot 10^{11}$ (5,9)	–	–
^{239}Pu	$24,39 \cdot 10^3$ лет	$1,69 \cdot 10^{12}$ (43)	$1,6 \cdot 10^{13}$ (44)	$2 \cdot 10^{12}$ (55)	$4 \cdot 10^{12}$ (110)	–
^{240}Pu	$6,54 \cdot 10^3$ лет	$4,4 \cdot 10^{12}$ (120)	$8,5 \cdot 10^{12}$ (230)	$7,8 \cdot 10^{12}$ (210)	$3,1 \cdot 10^{12}$ (84)	–
^{241}Pu	15 лет	$3,1 \cdot 10^{14}$ ($8,5 \cdot 10^3$)	$4,8 \cdot 10^{12}$ (130)	$3,1 \cdot 10^{11}$ (8,4)	$1,4 \cdot 10^{11}$ (3,9)	–
^{242}Pu	$3,87 \cdot 10^5$ лет	$7,4 \cdot 10^9$ (0,2)	$7,4 \cdot 10^9$ (0,2)	$7,4 \cdot 10^9$ (0,2)	$7,4 \cdot 10^9$ (0,2)	$1,1 \cdot 10^9$ (0,03)
^{241}Am	433 года	$1,6 \cdot 10^{14}$ ($4,3 \cdot 10^3$)	$1,5 \cdot 10^{14}$ ($4 \cdot 10^3$)	$3,5 \cdot 10^{13}$ (950)	$1,4 \cdot 10^{11}$ (3,9)	–
^{242}Am	152 года	$8,5 \cdot 10^{12}$ (230)	$5,5 \cdot 10^{12}$ (150)	$9,6 \cdot 10^{10}$ (2,6)	–	–
^{243}Am	$7,37 \cdot 10^3$ лет	$1,8 \cdot 10^{13}$ (480)	$1,8 \cdot 10^{13}$ (480)	$1,6 \cdot 10^{13}$ (440)	$7,2 \cdot 10^{12}$ (195)	–

Примечание. Расчет произведен в предположении, что 0,5% плутония попадает в ВАО.

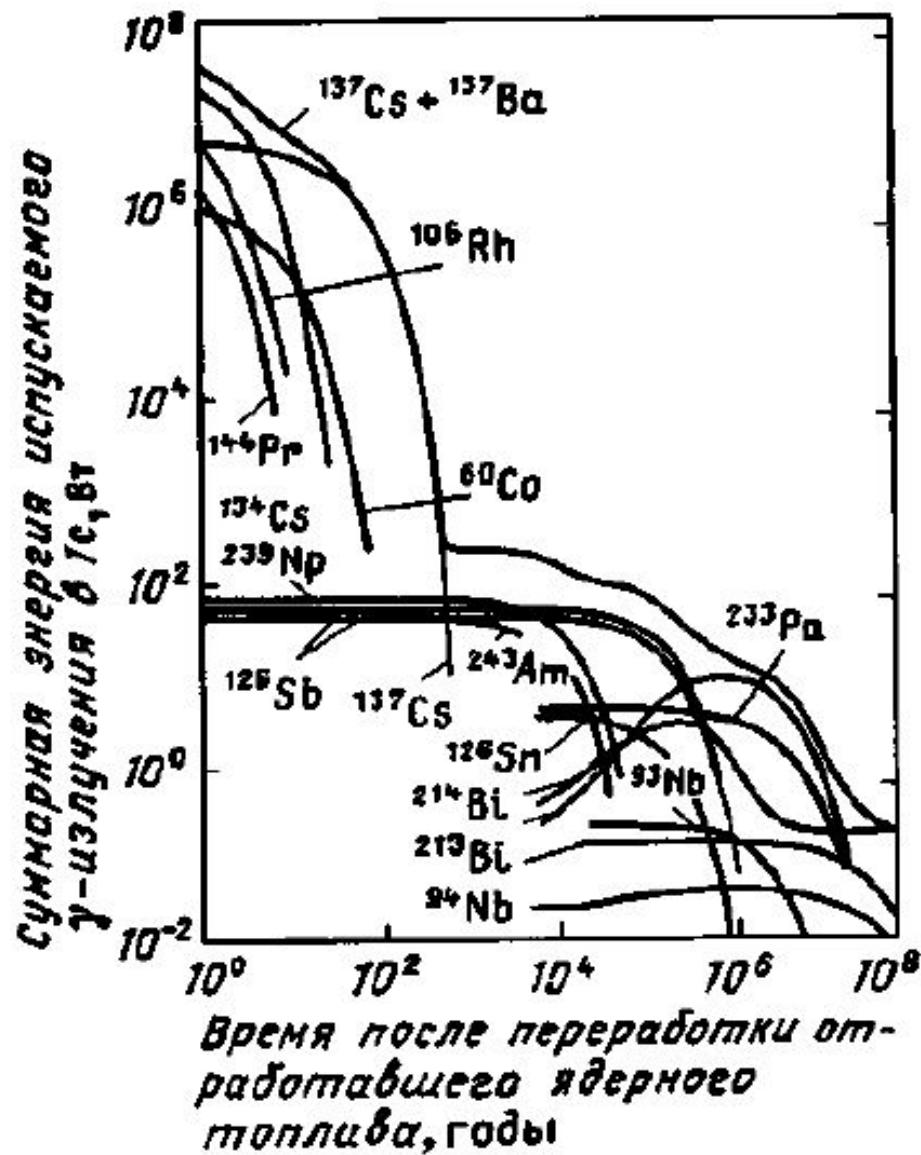


Рис. 7.1. Снижение интенсивности γ -излучения высокоактивных отходов в зависимости от времени (суммарная энергия рассчитана на отходы, полученные из топлива АЭС мощностью 400 ГВт)

Регламентирующей основой при выборе способов обращения с отходами служат рекомендации Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), а также документы специальных органов в каждой стране, устанавливающие предельно допустимые уровни загрязнений природных объектов по каждому радионуклиду. В России таким документом являются **НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (НРБ-99/2009)**. На основе этих норм устанавливаются предельно допустимые выбросы вредных веществ из промышленных источников в атмосферу и гидросферу, обеспечивающие соблюдение стандартов (допустимых концентраций) на чистоту воздуха для населения, животного и растительного мира.

В США применяют **НОРМЫ ALAP** (as low as practicable), т.е. столь низкие нормы сбросов радионуклидов в окружающую среду, какие только можно технически достичь. Они значительно ниже предельно допустимых и рекомендованных МКРЗ норм, в основе которых лежит принцип **ALARA** (as low as reasonably achievable), т.е. настолько низких, насколько это целесообразно и приемлемо с учетом социальных и экономических факторов.

История не знает другой отрасли промышленности, кроме атомной, к которой в самом начале ее развития предъявляли бы столь жесткие требования по уменьшению ее вредного воздействия на окружающую среду. **РАДИОХИМИЧЕСКИЕ ЗАВОДЫ** по переработке облученного топлива АЭС с точки зрения воздействия на окружающую среду **ДОЛЖНЫ УДОВЛЕТВОРЯТЬ СЛЕДУЮЩИМ ТРЕБОВАНИЯМ.**

1. **ГАЗОВЫЕ ВЫБРОСЫ** в атмосферу не должны содержать радионуклиды в количестве, превышающем предельно допустимое их содержание в приземном слое атмосферы при самых неблагоприятных метеорологических условиях

2. **ЖИДКИЕ ВАО И САО** должны быть переведены в форму, пригодную для их окончательного удаления в геологические формации и надежной изоляции их от биосферы до полного обезвреживания в результате естественного распада радионуклидов. Хранение жидких радиоактивных отходов в специальных резервуарах не исключает их утечки, поэтому его можно рассматривать лишь как временную меру.

3. **ЖИДКИЕ НАО** перед их сбросом в гидросферу следует подвергать очистке от радионуклидов до уровней, исключающих превышение установленных предельно допустимых концентраций для каждого радионуклида.

В соответствии с этими требованиями некоторые методы очистки газовых и жидких отходов уже разработаны и внедрены в практику. Однако **НЕ ВСЕ ЗАДАЧИ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ДОВЕДЕНЫ ДО ТЕХНИЧЕСКИ ПРИЕМЛЕМЫХ РЕШЕНИЙ.** Это – **ЗАДАЧИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ^{129}I , T, ^{85}Kr и ^{14}C , СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМОВ ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ РЕГЕНЕРАЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ, РАЗРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ВАО И САО** с получением механически, химически, термически и радиационно стойких композиций, а также **РАЗРАБОТКИ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПРОДУКТОВ.**

Можно рассматривать, по крайней мере, **ЧЕТЫРЕ СПОСОБА ИЗОЛЯЦИИ ОТХОДОВ**, в той или иной степени обеспечивающих предотвращение загрязнения биосферы радионуклидами: **ХРАНЕНИЕ ОТХОДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ, ЗАХОРОНЕНИЕ ИХ В ГЛУБИННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ ЗЕМЛИ, УДАЛЕНИЕ В КОСМОС ЗА ПРЕДЕЛЫ ЗЕМЛИ** и, наконец, **ПРЕВРАЩЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ НУКЛИДОВ В КОРОТКОЖИВУЩИЕ СЖИГАНИЕМ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ (МЕТОД ТРАНСМУТАЦИИ).**

НА ПРАКТИКЕ, однако, пока используется **ТОЛЬКО ХРАНЕНИЕ ОТХОДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ**, при котором контролируемое хранение отходов осуществляют в надежно защищенных, многостенных хранилищах, обеспеченных сложными системами охлаждения, вентиляции и контроля. Их герметичность гарантируется регулярным надежным контролем и систематическими профилактическими мероприятиями. В настоящее время хранению подлежат жидкие отходы, отходы, упаренные до солевого кека, кальцинаты и другие формы отвержденных отходов, а также непереработанное топливо. Такие отходы могут быть извлечены из хранилища для дальнейшей обработки или захоронения в соответствии с вновь принятыми решениями.

Определяли **ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА, ВЫДЕЛЯЮЩЕГОСЯ ПРИ РАСПАДЕ НЕКОТОРЫХ ИЗОТОПОВ**, в частности ^{90}Sr и ^{137}Cs , содержащихся в отвержденных высокоактивных отходах. В США разработан проект, по которому предполагают получать пар низкого давления за счет тепла, выделяющегося при хранении отвержденных высокоактивных отходов, причем в качестве исходного показателя принято, что тепловыделение отходов составляет 300 Вт/дм^3 .

По полученным предварительным оценкам оказалось, что использование тепла, выделяющегося при хранении контейнеров с отходами, в таком случае экономически выгодно.

УДАЛЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО за пределы Земли обеспечивает наиболее полную их изоляцию от человека и окружающей среды, если не учитывать нерешенную проблему надежности при запуске космических аппаратов и последствия возможного аварийного повторного входа в атмосферу капсулы с отходами. Кроме того, высокая стоимость запуска в космос значительно снижает практическую ценность этого способа. Тем не менее, он рассматривается как возможный для изоляции фракции актиноидов, содержащей радионуклиды с периодами полураспада до сотен тысяч лет. Однако осуществление такого способа требует предварительного выделения актиноидов из высокоактивных отходов.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ АКТИНОИДОВ В КРОТКОЖИВУЩИЕ РАДИОНУКЛИДЫ или даже в стабильные изотопы облучением в реакторе или на ускорителе можно рассматривать как заманчивую идею, позволяющую решить проблему их обезвреживания.

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Для осуществления этой идеи необходимо разработать способ извлечения фракции актиноидов из высокоактивных отходов и иметь в наличии высокопоточный реактор или ускоритель. Однако оценка метода трансмутации показала, что, хотя он принципиально осуществим, современный уровень техники недостаточен для его успешной реализации. В существующих ядерных реакторах метод трансмутации не удастся осуществить полностью, т.к. наряду с процессами деления протекает и захват нейтронов с образованием тяжелых элементов с большими периодами полураспада. По-видимому, обезвреживание α -излучателей из отходов методом трансмутации мог бы стать целесообразным при облучении в реакторах с плотностью потока нейтронов 10^{16} - 10^{17} нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ или в термоядерных реакторах. Однако такие реакторы пока не существуют.

При современном уровне развития техники из способов окончательного удаления отходов из биосферы **ПРАКТИЧЕСКИ ОСУЩЕСТВИМ ЛИШЬ СПОСОБ ЗАХОРОНЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С ОТВЕРЖДЕННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ В ШАХТНЫЕ ВЫРАБОТКИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ГЛУБИННЫХ УСТОЙЧИВЫХ ФОРМАЦИЯХ.**

Характеристики различных типов геологических формаций и горных пород, пригодных для захоронения отходов, изучают во многих странах. Основные результаты этих работ будут рассмотрены ниже в **разд. 7.7.**

Возможная схема обращения с радиоактивными отходами в общем виде изображена на рис. 9.2. В схему включен также вариант, в котором отработавшее топливо не регенерируется, а рассматривается как высокоактивные отходы. В этом случае объем отходов, подлежащий захоронению, возрастает и исключается как возможность использования продуктов деления и трансплутониевых элементов, так и возможность рецикла урана и плутония.

Методы захоронения непереработанного топлива начали активно разрабатывать в Канаде, США, Германии и Швеции лишь в последнее десятилетие. В этих странах предусмотрено хранение ОЯТ в сухих контейнерах или под водой в течение продолжительного периода времени (до 50 лет). Затем сборки топлива предполагается упаковывать в защитные чехлы или контейнеры и захоранивать в специальных хранилищах, расположенных в геологических формациях на глубине 500-1000 м. В 1985 г. было сдано в эксплуатацию первое в мире хранилище для топлива в Швеции. 19

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ



ОТ – оработанное топливо; ГО – газообразные отходы; CAO – среднеактивные отходы; НАО – низкоактивные отходы; ВАО – высокоактивные отходы; ТУЭ – трансураниевые элементы; пунктир – теоретически рассматриваемые варианты

Рис. 9.2. Обращение с радиоактивными отходами

Хранилище сооружено на полуострове Симпеварп в скальных породах на глубине около 50 м. Здесь топливо будет храниться 40 лет. В течение этого времени будет построено хранилище для окончательного удаления топлива, сдача в эксплуатацию которого предусмотрена в 2020 г. В США предполагают закончить строительство первого хранилища для окончательного удаления топлива в 1998 г., Канаде – после 2010 г.

Отвержденные высокоактивные отходы, так же как и непереработанное топливо, предполагается хранить в течение 40-60 лет в наземных сооружениях, а затем захоранивать в условиях, близких к условиям захоронения непереработанного топлива.

Таким образом, до начала промышленного захоронения ВАО есть еще несколько десятилетий. За это время должны быть уточнены условия безопасного и надежного захоронения отходов.

7.3. Жидкие высокоактивные отходы

Источником образования жидких ВАО являются рафинаты I цикла экстракции, которые представляют собой азотнокислые растворы, содержащие радионуклиды, продукты коррозии и химические реагенты.

Таблица 7.7. Состав ВАО, образующихся при переработке топлива легководных реакторов

Характеристика отходов	Франция UR 2 800	Германия WA-350	Япония
Объем, дм ³ /т	300-5410	800	300-1000
Свободная кислотность по HNO ₃ , М	2	5	2-7
Возраст отходов при остекловывании, лет	4-6	7	5-6
Продукты деления, кг/(МВт·сут)	26	35	30
Актиноиды, кг/т	1,48	3,6	7,5
Продукты коррозии, кг/т	8,3	2,6	7,2
Активность, Бк/т	1,9·10 ¹⁶	1,7·10 ¹⁶	1,85·10 ¹⁶
Тепло выделение, Вт/дм ³	18,5		~9,3

Солевой состав зависит от матрицы ТВЭЛов, возвратов различных растворов на I цикл, а также наличия в схеме упарки операций разрушения азотной кислоты. Объем жидких ВАО составляет 5-10 м³/т ядерного топлива. Эти отходы подвергают упариванию. При этом объем их сокращается в 10 и более раз (табл. 7.7). Степень концентрирования определяется характером отходов, возможностью образования нежелательных осадков в концентрате, а также условиями хранения концентрата, в частности наличием систем охлаждения в емкостях для хранения концентрата.

Средняя удельная активность концентрата ВАО составляет $3,7 \cdot 10^{13}$ - $1,1 \cdot 10^{14}$ Бк/дм³. При этом тепловыделение на $3,7 \cdot 10^{13}$ Бк для осколочных нуклидов составляет примерно 12 кДж/ч, для α -излучателей – около 100 кДж/ч. В результате радиолиза в концентрате ВАО образуется 0,01 г/($3,7 \cdot 10^{13}$ Бк·ч) водорода. Помимо продуктов деления в ВАО содержится значительное количество актиноидов и продуктов коррозии.

До последнего времени в качестве основного метода обращения с жидкими ВАО было принято хранение жидкого концентрата в специальных емкостях различной вместимости (70-1500 м³), снабженных теплообменниками для охлаждения раствора, системами вентиляции для удаления водорода, системами контроля и автоматического управления для поддержания заданных режимов. Срок эксплуатации емкостей до их замены принимают равным 20-30 годам.

ЕМКОСТИ представляют собой **БАКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, УСТАНОВЛЕННЫЕ В БЕТОННЫЕ ОТСЕКИ**, облицованные также нержавеющей сталью для повышения надежности хранения. Например, хранилищем жидких концентратов ВАО на заводе на м. Аг является железобетонная камера, полностью расположенная под землей, в которой размещены баки из нержавеющей стали полезным объемом 120 м³ каждый.

ДЛЯ ОТВОДА ТЕПЛА используют **ПРИНУДИТЕЛЬНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ** через находящиеся в баке теплообменники охлаждающей воды, с помощью которой температуру ВАО поддерживают на уровне 60 °С. Охлаждение обеспечивается двумя независимыми замкнутыми контурами, присоединенными к внешнему теплообменнику. При выходе, из строя одной охлаждающей петли температура может достигнуть 85 °С. Для предотвращения аварии при вскипании раствора каждый бак соединен с конденсатором, охлаждаемым воздухом за счет естественной тяги. Пары конденсируются, конденсат возвращается в бак-хранилище. Осадок, присутствующий в концентрированных растворах, поддерживают во взвешенном состоянии непрерывным перемешиванием воздухом. Продувка воздухом обеспечивает разбавление водорода, образующегося в результате радиолиза. Допустимая концентрация водорода составляет 0,2%.

Практика хранения высокоактивных отходов в щелочной форме в баках из углеродистой стали (США) имеет ряд недостатков, ограничивающих возможность последующей переработки ВАО. В частности, при нейтрализации увеличивается объем отходов, образуются осадки и шламы, затрудняющие опорожнение баков. Кроме того, наблюдались случаи растрескивания баков из углеродистой стали и утечки отходов.

ЖИДКИЕ ВАО ПО ИСТЕЧЕНИИ ПЕРИОДА ВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ПЕРЕВОДЯТ В ТВЕРДУЮ ФОРМУ. Процесс отверждения в самом общем виде может включать последовательно такие стадии, как концентрирование раствора упариванием, денитрацию, сушку, прокаливанию, плавление, отверждение расплава, отжиг. Возможны и другие методы отверждения, например заключение стеклопродуктов в металлические матрицы, покрытие частиц кальцината пироуглеродом или металлом и др. В разработанных в разных странах способах отверждения используют или все упомянутые стадии, или лишь часть этапов отверждения (табл. 7.8). При этом образуются твердые продукты, в большей или меньшей степени удовлетворяющие требованиям химической, термической, механической и радиационной стойкости.

Таблица 7.8. Методы отверждения жидких высокоактивных ОТХОДОВ

Отвержденный продукт	Метод отверждения	Краткая характеристика продукта	Масштаб реализации метода	Страна
Солевой кек	Упаривание	Форма временного хранения, пригодная для превращения в стекло, керамику и другие продукты	Промышленный	США (Ханфорд, Саванна-Ривер)
Кальцинат	Прокаливание	Тоже	Промышленный	США (Айдахо)
Минералоподобный продукт типа канкренита или нефелина	Водно-силикатный процесс	Форма долговременного хранения	Укрупненный, лабораторный	США (Ханфорд, Саванна-Ривер), Канада
Минералоподобный продукт синрок	Кристаллизация из расплава или горячее прессование	Форма захоронения	То же	Австралия, США

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ**Продолжение табл. 7.8.**

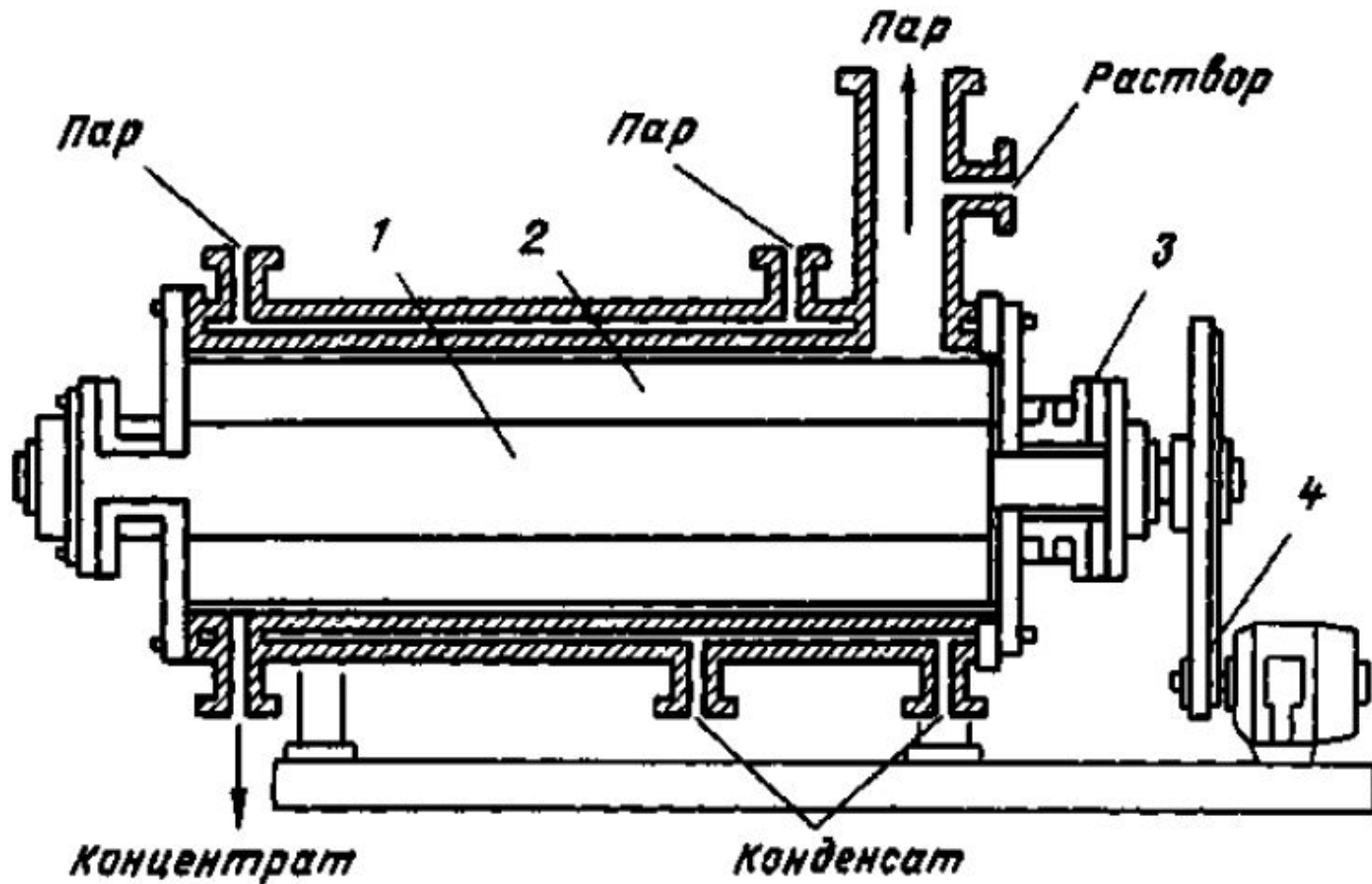
Отвержденный продукт	Метод отверждения	Краткая характеристика продукта	Масштаб реализации метода	Страна
Стекло:				
боросиликатное	Плавление	Форма захоронения отходов	Промышленный, полупромышленный Укрупненный лабораторный	Франция (Маркуль), США, Великобритания, Япония, Индия, Италия, Россия, Германия
фосфатное	То же	Форма, пригодная для захоронения отходов или для изготовления сложных композиций	Укрупненный, лабораторный, полупромышленный	Германия, Бельгия, Россия, США
базальтовое	То же	Форма захоронения отходов	Лабораторный	США, Франция
содоизвестковое	То же	То же	То же	США

Отвержденный продукт	Метод отверждения	Краткая характеристика продукта	Масштаб реализации метода	Страна
Керамика:				
на основе боросиликатного стекла	Специальный отжиг	То же	То же	Германия
минералоподобная	Термитный процесс	То же	То же	США, Германия
Керамика	Прокаливание на пористых керамиках, плавление	Форма хранения, захоронения	Лабораторный	Россия
Суперкальцинат	Горячее прессование и отжиг	Форма захоронения отходов	То же	США
Композиция витромет	Включение стекла в металлическую матрицу	То же	То же	Германия, Бельгия, США, Россия
Кермет	Включение частиц кальцината в металлическую матрицу	То же	То же	США, Австрия
	Покрытие частиц кальцината стеклом, углеродом и др.			США, Австрия

Упаривание жидких ВАО широко применяют в США в двух крупнейших хранилищах отходов: в Ханфорде и Саванна-Ривере, где наряду с традиционными аппаратами-испарителями используют пленочные выпарные аппараты, предназначенные для превращения высокозасоленных жидких отходов в пасты, полностью отвердевающие при охлаждении, или в "текучие" порошки (рис. 7.3).

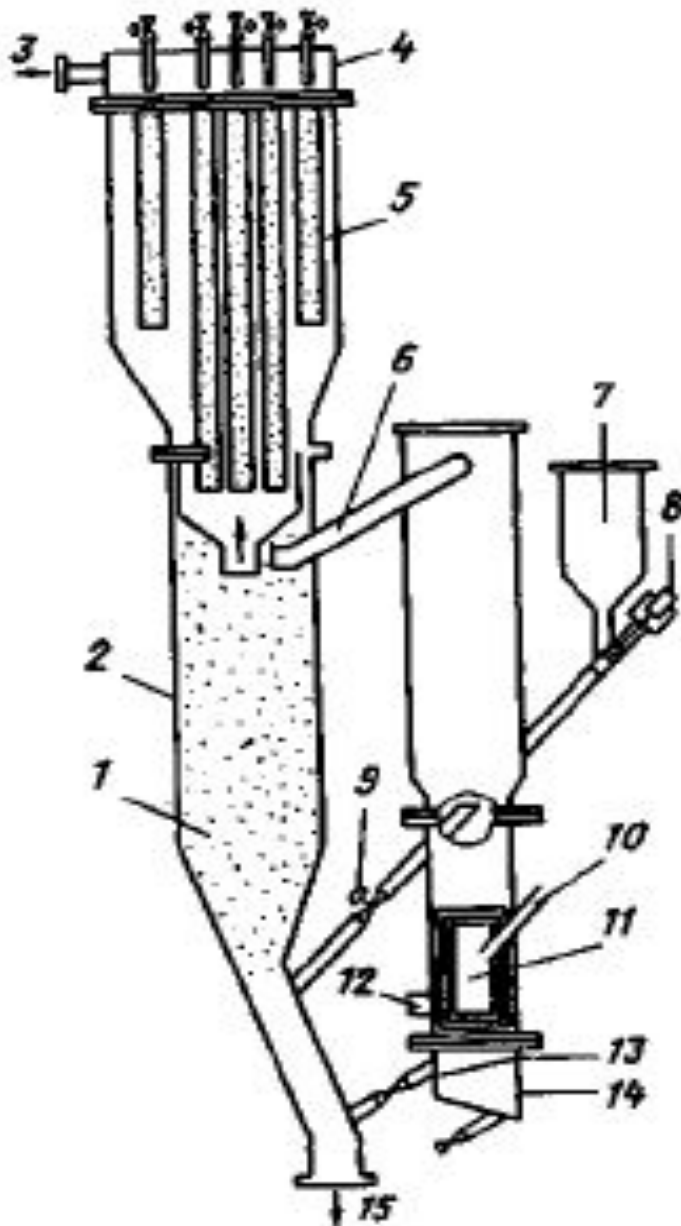
Метод прокаливания, позволяющий сократить объем отходов примерно в 10 раз, заключается в том, что отходы высушивают и прокаливают в специальных аппаратах при нагревании до 500-900 °С, превращая их в **ТВЕРДЫЙ ПРОДУКТ – КАЛЬЦИНАТ**, представляющий собой **СМЕСЬ ОКСИДОВ ВСЕХ МЕТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ИСХОДНОМ РАСТВОРЕ ВАО**. Кальцинат из-за низкой теплопроводности и высокой скорости выщелачивания не может быть использован для окончательного захоронения, но удобен как исходное сырье для дальнейшего превращения отходов в более прочные материалы.

Прокаливание (кальцинацию) отходов можно осуществлять в печах распылительного типа, с кипящим псевдоожиженным слоем, во вращающихся трубчатых печах или тиглях, предназначенных одновременно и для плавки стекла (рис. 7.4 и 7.5).



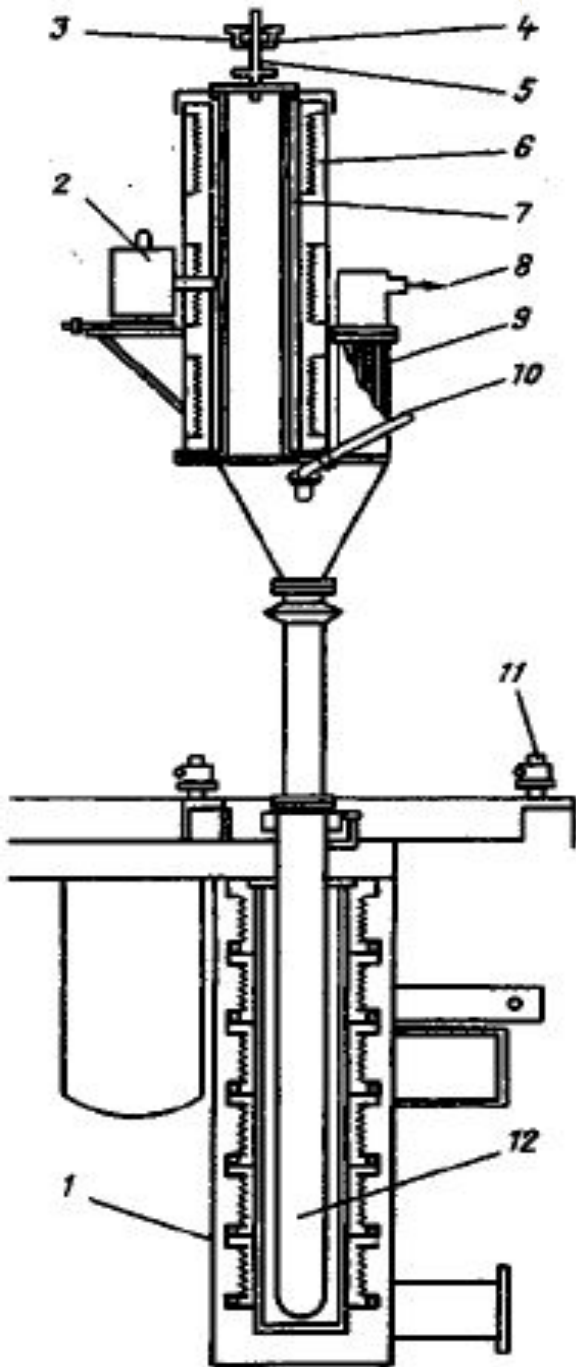
1 – ротор; 2 – нож для снятия пленки; 3 – уплотнение вала; 4 – ременный привод

Рис. 7.3. Схема горизонтального пленочного выпарного аппарата



- 1 – мелкие частицы кальцината;
- 2 – камера циклона;
- 3 – выход газа;
- 4 – камера обратной продувки;
- 5 – металл окерамические фильтры;
- 6 – выход газа и тонкой пыли в циклон;
- 7, 8 – инертный материал и его питатель для образования псевдоожиженного слоя;
- 9 – клапан, контролирующий перелив псевдоожиженного слоя;
- 10 – подача исходного раствора отходов;
- 11 – псевдо-ожиженный слой;
- 12 – подача топлива (керосина) в слой;
- 13 – распределяющая пластина;
- 14 – псевдоожиженный газ и область повышенного давления;
- 15 – выгрузка кальцината

Рис. 7.4. Схема кальцинатора с псевдоожиженным слоем



- 1 – печь аппарата для плавки в контейнере;
- 2 – вибратор;
- 3 – подача воздуха для распыления;
- 4 – жидкие отходы;
- 5 – сопло для исходного раствора;
- 6 – печь;
- 7 – распылительный кальцинатор;
- 8 – выход пара;
- 9 – фильтр;
- 10 – подача фритты;
- 11 – устройство для подъема контейнеров;
- 12 – контейнер

Рис. 7.5. Схема распылительного кальцинатора и аппарата для плавки в контейнере

Этот процесс успешно применяли на заводе в Айдахо (США) для перевода в кальцинат в аппаратах с кипящим псевдоожиженным слоем растворов высокоактивных отходов от переработки топлива в алюминиевой оболочке, фторсодержащих растворов от переработки топлива в циркониевой оболочке и др.

Предложено **ВКЛЮЧАТЬ ОКСИДЫ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В СТЕКЛООБРАЗНУЮ МАТРИЦУ**, т.к. стекло, будучи нестехиометрическим соединением, при нагревании способно растворять, а при последующем охлаждении прочно удерживать сложную смесь оксидов продуктов деления. Получаемый продукт обладает высокой химической и радиационной стойкостью, является изотропным, непористым. Главный недостаток стекла – его термодинамическая неустойчивость, которая проявляется в кристаллизации стекла (расстекловывание) под действием высокой температуры, обусловленной радиоактивным распадом. Расстекловывание ухудшает первоначальные свойства продукта, в частности приводит к возрастанию скорости его выщелачивания. Тем не менее, в настоящее время **ОСТЕКЛОВЫВАНИЕ РАССМАТРИВАЕТСЯ КАК НАИБОЛЕЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЙ МЕТОД ОТВЕРЖДЕНИЯ ЖИДКИХ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ.**

После многочисленных исследований состава стекол, проведенных в Великобритании, России, США, Франции, Германии и других странах, наиболее пригодными были признаны **БОРОСИЛИКАТНЫЕ, ФОСФАТНЫЕ И БОРО-ФОСФАТНЫЕ СТЕКЛА** (табл. 7.9).

В табл. 7.10 приведены составы стекол с указанием возможных пределов содержания каждого компонента. Здесь же в качестве примера показаны составы боро-силикатных стекол, полученных на установках AVM (Франция), VERA (Германия) и Fingal (Великобритания). Реальные **СОСТАВЫ СТЕКОЛ** существенно **ЗАВИСЯТ ОТ ИСХОДНОГО СОСТАВА ОТХОДОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЯЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОСТЕКЛОВАВАНИЯ: СПОСОБА ДЕНИТРАЦИИ ОТХОДОВ, ПРИМЕНЯЕМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИХ КАЛЬЦИНИРОВАНИЯ, СПОСОБА НАГРЕВА, РЕЖИМА ПРОЦЕССОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ** и т.п.

В последние годы активно проводятся исследования технологии остекловывания, в частности отрабатываются режимы варки стекла, испытываются аппаратура и различные конструкционные материалы, решаются вопросы газоочистки и автоматического управления процессом остекловывания. Испытано несколько установок по остекловыванию.

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Таблица 7.9. Характеристика установок для остекловывания высокоактивных отходов

Страна, местонахождение	Установка	Дата пуска	Тип процесса	Природа стекла	Масштаб реализации, кг/ч стекла	Режим работы
Бельгия, Моль	PAMELA	1985	Плавление в керамическом плавителе, включение в металлическую матрицу	Боросиликатное	30-40	Полунепрерывный
Бельгия, Моль Великобритания, Селлафилд	AVB WVP	1987 1989	Двухстадийный типа AVM Двухстадийный типа AVM Одностадийный, плавление в тигле	То же	15 25 или 60 т/год	Непрерывный То же
	Harvest I	1977	Одностадийный, плавление в тигле	То же	Лабораторный	Периодический
Индия, Тарапур	WIP	1983	Одностадийный, плавление в тигле	То же	4	То же
Италия, Тризайя	IVET-2	1988	То же	То же	100 дм ³ в неделю	То же
США, Вест-Вэлли	WVDP	1988	Одностадийный, плавление	То же	2200м ³ ВАО к 1990 г.	Полунепрерывный

Страна, местонахождение	Установка	Дата пуска	Тип процесса	Природа стекла	Масштаб реализации, кг/ч стекла	Режим работы
Саванна-Ривер	DWPF	1989	в керамическом плавителе Одностадийный, плавление	Боросиликатное	1500 кг/сут	То же
Ханфорд	HWVP	1990	в керамическом плавителе	То же	900 т/год	То же
Россия	Установка для остекловывания RIVER	1974	Одностадийный, плавление в керамическом плавителе	То же	Опытно-промышленный 100 дм ³ /ч	Периодический
Франция, Маркуль RIVER	PIVER	1969 (в 1974 остановлена)	Плавление в тигле	Боросиликатное	Полупромышленный	Полунепрерывный
Франция, Маркуль AVM	AVM	1978	AVM 1 нитка, двухстадийный	Боро силикатное	12-20 кг/ч	Непрерывный
Франция, м. Аг	AVH-R7	1987	AVM 3 нитки	Боросиликатное	220 т/год с одной нитки	Непрерывный
м. Аг	AVM-T7	1989	AVM 3 нитки	То же	–	То же
Германия, Юлих	FIPS-1 FIPS-2	1984 1982	Упаривание, денитрация, сушка, плавление стекла в тигле	То же То же	1 кг/ч 1,5 кг/ч	Периодический, многостадийный
Германия, Карлсруэ	VERA VA-II	1970 1983	Плавление в керамическом плавителе, одностадийный	То же	35 кг/ч неактивных материалов	Полунепрерывный
	VERA-II	–	–	–	Полупромышленный	Непрерывный

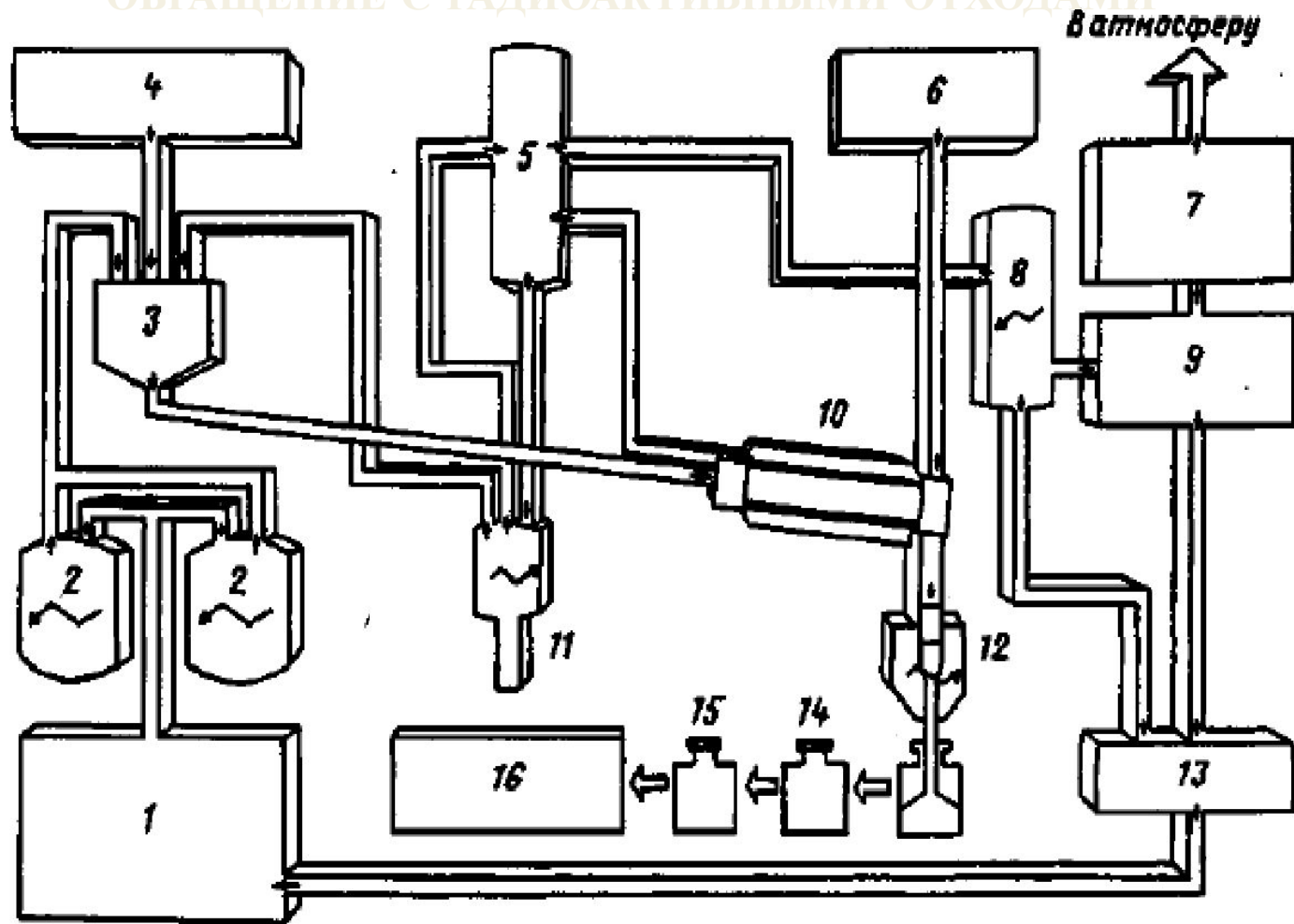
Таблица 7.10. Состав стекол, % мас.

Компонент	Боросиликатные стекла			Фосфатные стекла	Боросиликофосфатные стекла
	AVM	VERA	Fingal		
SiO_2	42-49	42	40	–	15-40
B_2O_3	13-17	8	9,5	–	10-20
P_2O_5	–	–	–	50-60	–
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$	5-15	2	–	0-15	15-30
$\text{Na}_2\text{O-Li}_2\text{O}$	8-11	16	7,5	5-10	0-5
CaO-MgO	–	4	2	–	–
TiO_2	–	8	3	–	–
ZnO	–	–	5	–	5-15
MoO_3	–	–	–	–	–
Продукты деления	16-25	20	20	25-35	20

Во Франции в Маркуле создана полунепрерывная установка River, на которой было получено 12 т боросиликатного стекла с максимальной активностью $1,1 \cdot 10^{14}$ Бк/дм³. На этой установке жидкие отходы от переработки топлива газографитовых реакторов вместе со стеклообразующими добавками поступали в тигель из инконеля-601, где происходили их высушивание и кальцинация. Диаметр тигля составлял 250-300 мм, высота 2300 мм. После заполнения тигля на 80 % объема температуру повышали до 1150 °С, материал плавился. Образующийся расплав стекла периодически сливали через дренажное отверстие. Было проведено более 120 активных плавок.

В 1978 г. в Маркуле введена в эксплуатацию первая в мире промышленная непрерывно действующая установка AVM (L'Atelier de Vitrification de Marcoule) (рис. 7.6).

УСТАНОВКА СОСТОИТ ИЗ ПЕЧИ для сушки и прокаливания отходов, представляющей собой вращающуюся трубу диаметром 270 и длиной 3600 мм, установленной под небольшим уклоном и обогреваемой **ЧЕТЫРЕХЗОННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧЬЮ, КЕРАМИЧЕСКОГО ТИГЛЯ** для плавки стекла с индукционным нагревом и **СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ**. Кроме того, **УСТАНОВКА РАСПОЛАГАЕТ ДВУМЯ БАКАМИ** вместимостью по 15 м³ для приема жидких отходов, **ЕМКОСТЬЮ ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ СОСТАВА ОТХОДОВ** и **МЕХАНИЗМОМ** для **РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА**.



1 – завод химической переработки облученного топлива, концентрирование или временное хранение растворов, содержащих продукты деления; 2 – сборник растворов, содержащих продукты деления; 3 – регулировка расхода; 4 – добавки для кальцинации; 5 – улавливание пыли; 6 – стеклофритта; 7 – фильтр; 8 – конденсатор; 9 – газоочистка; 10 – кальцинатор; 11 – бак возврата на повторный цикл; 12 – печь варки стекла; 13 – жидкие отходы; 14 – тигли с остеклованными отходами; 15 – дезактивация наружной поверхности; 16 – хранилище остеклованных отходов

Рис. 7.6. Основные стадии процесса остекловывания на установке AVM в Маркуле (Франция)

Отходы из дозатора со скоростью около 30 дм³/ч непрерывно поступают в кальцинатор, на входе в который устанавливают температуру 600 °С, а на выходе 900 °С. Для получения плотного гранулообразного материала существенное значение имеют внутренняя конструкция трубчатой печи и состав добавок к отходам, предотвращающих их налипание на стенки.

КАЛЬЦИНАТ смешивают со стеклофриттой и непрерывно **ПОДАЮТ В ПЛАВИЛЬНУЮ ПЕЧЬ** (диаметр 550 мм, высота 1000 мм), обогреваемую пятью индукционными нагревателями, повышающими **ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАВА СТЕКЛА ДО 1150 °С**. Расплавленное стекло накапливается в печи в течение 8 ч. Затем **СТЕКЛЯННУЮ ПРОБКУ** в донной части печи **РАСПЛАВЛЯЮТ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И СТЕКЛО ВЫЛИВАЮТ В СТАЛЬНЫЕ КОНТЕЙНЕРЫ** диаметром 50 см и высотой 1 м. Для заполнения одного контейнера требуется три выгрузки стекла, в результате чего образуется **СТЕКЛОБЛОК** объемом 150 дм³ и массой 350 кг.

После заполнения контейнеров их герметично закрывают крышками, поверхность контейнеров обмывают водой под давлением и, проконтролировав степень очистки поверхности, направляют в хранилище.

Здесь контейнеры размещают в вертикальных колодцах высотой 10 м и диаметром 60 см. Охлаждение контейнеров осуществляют с помощью принудительной воздушной вентиляции. Температура воздуха на входе в колодец 25 °С, в нижней части колодца 40 °С, на выходе 100 °С. Температура на верхней поверхности бетонной плиты – крыши хранилища – не должна превышать 45 °С. Удельная тепловая мощность остеклованных на АVM отходов составляет 50 Вт/дм³.

Следующим этапом французской программы было строительство на м. Аг установки AVH (L'Atelier de Vitrification de L'Hague), предназначенной для остекловывания ВАО от переработки оксидного топлива легководных реакторов. Предусмотрено последовательное строительство шести линий остекловывания (по три в установках R-7 и T-7) с производительностью одной линии 220 т остеклованных отходов в год.

В целом схемы процессов остекловывания на установках АVM и AVH близки. Основное различие заключается в использовании на установке AVH керамического (а не металлического, как на установке АVM) тигля для плавки стекла и в способе нагрева стекломассы.

В Великобритании отработывали периодический способ остекловывания отходов, осуществляемый в тигле, который затем служит контейнером для хранения стекла (табл. 7.10). В этом процессе в разных зонах одного и того же тигля одновременно осуществляют упаривание жидких ВАО, прокаливание образующегося концентрата в плавку стекла. Температура в зоне плавки достигает 1050 °С. После заполнения контейнера стеклом его отключают от системы газоочистки и после приварки крышки направляют в систему контроля загрязнения поверхности и затем в хранилище.

Демонстрационные плавки стекла были осуществлены в Харуэлле на установке Fingal, оборудованной тиглем с диаметром 25 см, и на установке Harvest, имеющей тигель большего диаметра – 45 см. Испытания одностадийного процесса плавления боросиликатного стекла проводили на неактивных модельных материалах. Небольшая установка для отработки режимов плавления стекла на активном материале была построена в Селлафилде. Однако в 1980-1981 гг. после анализа известных методов отверждения фирма BNFL выбрала для остекловывания отходов Селлафилда французский непрерывный процесс AVM.

По контракту, подписанному фирмами BNFL и COGEMA, в Селлафилде построена установка WVP (Windscale Vitrification Plant) с двумя производственными нитками. Производительность по концентрату ВАО установки WVP 143 м³/год, по стеклопродукту 25 кг/ч, максимальная температура в кальцинаторе 800 °С, в печи для варки стекла 1100 °С.

В Германии изучали периодические и непрерывные процессы включения отходов в матрицы из боросиликатного стекла, и на этой основе разработан ряд способов и установок. В Юлихе в лабораторном масштабе исследован периодический процесс получения боросиликатного стеклопродукта. Способ и установка известны под названием **FIPS** (Fission Product Solidification) и предназначена для отверждения ВАО, получаемых при переработке топлива высокотемпературного реактора. Эти отходы отличаются высоким содержанием алюминия, фторид-, сульфат- и фосфат-ионов; кроме того, они могут содержать торий. На установке FIPS, работающей с производительностью 1 кг стекла/ч, получают стеклоблоки с удельной активностью $(1,85-2,22) \cdot 10^{14}$ Бк/кг и удельным тепловыделением 40 Вт/дм³.

Установка включает выпарной аппарат для концентрирования отходов, денитратор, емкость для смешения отходов со стеклообразующими добавками, вальцовую сушилку, с помощью которой при 120 °С суспензию превращают в сухой порошок, печь для плавки стекла и систему газоочистки.

В Карлсруэ разработан способ производства стеклопродуктов на основе боросиликатного стекла, получивший название **VERA** (Mehrzweck – Versuchsanlage für die Verfestigung von hochradioactiven Abfallösungen). Установка предназначена для отверждения отходов завода WAK, и строительство ее осуществлялось в два этапа. Первый этап – ввод в действие опытно-промышленной установки с полунепрерывным режимом работы. Второй этап – осуществление проекта **VERA-II**, согласно которому намечен переход к промышленной непрерывно действующей установке. Непрерывный процесс VERA включает стадию денитрации раствора муравьиной кислотой, прокаливание отходов в кальцинаторе распылительного типа, плавление кальцината со стеклообразующими добавками в печи, слив расплава стекла в подогретый тигель и систему газоочистки. Температура плавления стекла в печи достигает 1200 °С.

Для остекловывания ВАО завода **WAK-350** в Ваккерсдорфе построена установка для одностадийного процесса варки стекла в керамическом плавителе.

Способ варки стекла в керамическом плавителе разрабатывается в Германии, США и Японии. Первая керамическая печь с производительностью 20-40 кг/ч по стеклу была построена в Карлсруэ. Там же построена вторая печь усовершенствованной конструкции с двумя сливными каналами для стекла с производительностью до 100 кг/ч. При варке в керамическом плавителе жидкие отходы впрыскивают вместе со стеклообразующими добавками в печь, где происходит упаривание раствора, плавление стекла и его слив. Наиболее трудными для технологического воплощения являются способы нагрева ванны для варки стекла и слива стеклорасплава. Нагрев осуществляют введением в ванну керамической печи электродов для первоначального разогрева стекломассы и поддержанием температуры расплава около 1200 °С. Существенное значение имеет материал электродов, их поверхность, размещение в печи и плотность тока. В качестве материалов для электродов испытывался молибден, оксид олова, сплав молибдена с диоксидом циркония, инконель-690.

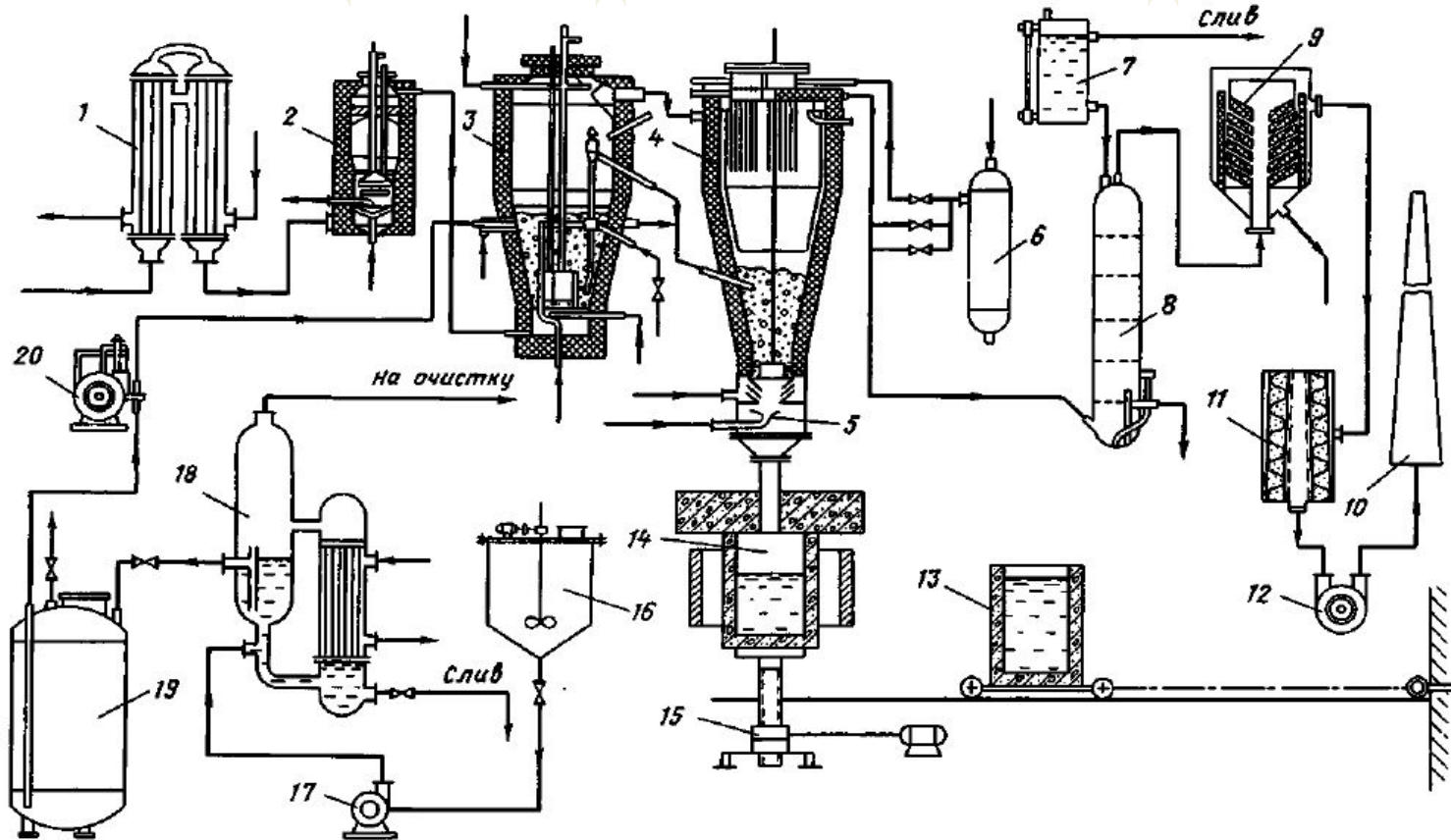
Процесс слива расплава стекла в контейнер из печи требует пристального внимания из-за периодичности осуществления, необходимости строгого контроля скорости слива, наличия специальной системы дополнительного нагрева или охлаждения сливного канала.

На фирме "Гельзенберг" **РАЗРАБОТАН СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФАТНОГО СТЕКЛА**, названного **PHOTHO**, и совместно с фирмой "Еврокемик" изучен способ включения гранул фосфатного стекла в металлическую матрицу, получивший название **PAMELA**. Способы **PHOTHO** и **PAMELA** различаются лишь заключительным этапом. Первые стадии одинаковы и включают концентрирование жидких отходов в присутствии фосфорной кислоты и формальдегида и остекловывание образовавшейся суспензии при 1000 °С. На последнем этапе способа **PAMELA** вместо стеклоблоков из фосфатного стекла получают бусинки (диаметром 5 мм), которые образуются при стекании капель стекла из канала печи на вращающийся диск из нержавеющей стали. Далее бусинки стекла заключают в металлическую (свинец, его сплавы) матрицу и получают стойкий материал, названный **ВИТРОМЕТ**.

НОВЫЙ МАТЕРИАЛ имеет ряд положительных качеств: **ХОРОШУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ОТСУТСТВИЕ СИЛЬНОГО РАЗОГРЕВА, ВОЗМОЖНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ В КОНТЕЙНЕРЕ С БОЛЬШИМ ДИАМЕТРОМ, ВЫСОКУЮ ХИМИЧЕСКУЮ И МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ.**

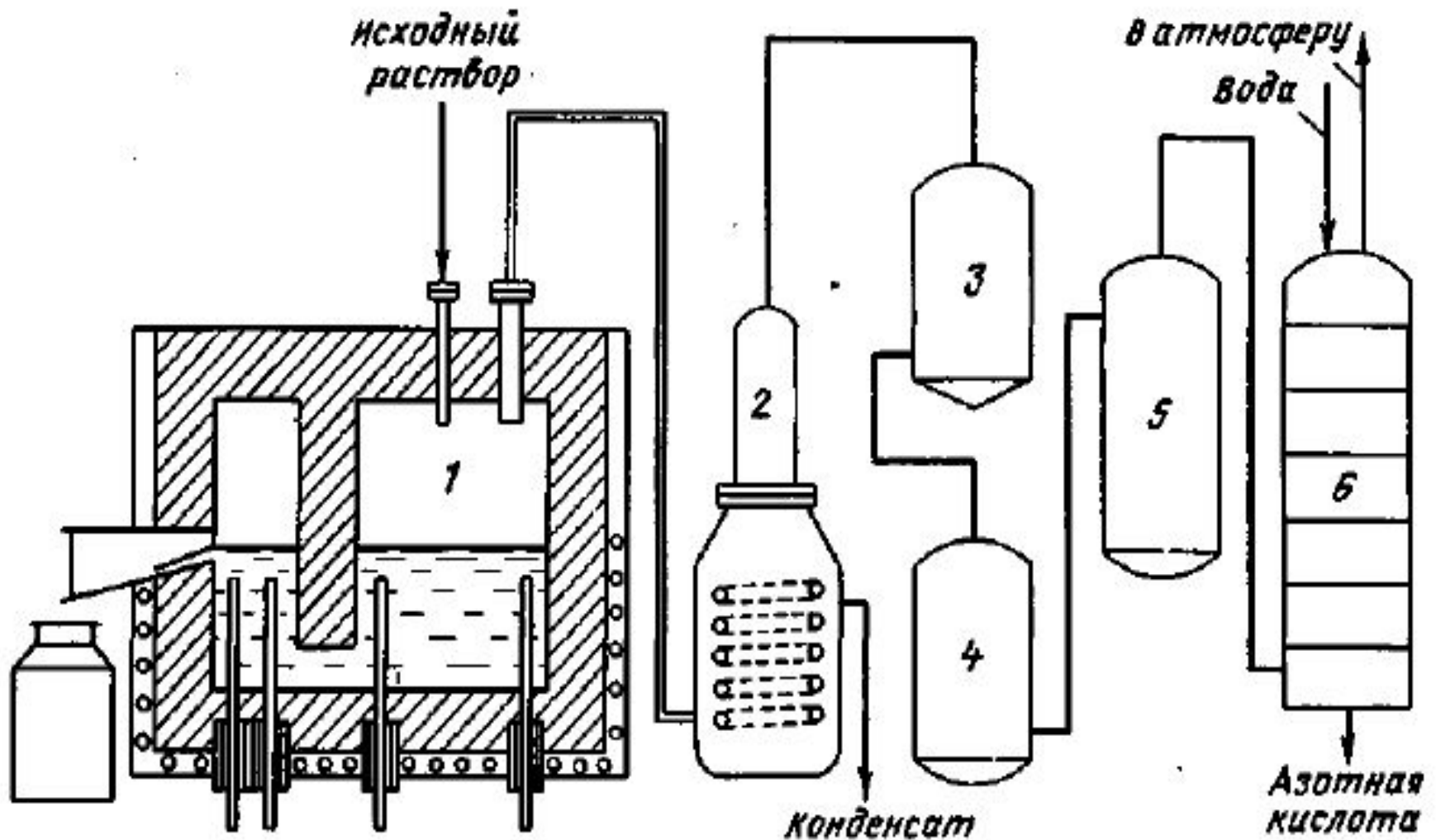
Процесс РАМЕЛА был РЕАЛИЗОВАН В ПОЛУПРОМЫШЛЕННОМ МАСШТАБЕ в г. Моле (Бельгия), где совместно с Германией была построена установка для отверждения ВАО завода фирмы "Еврокемик". НА этой УСТАНОВКЕ ПОЛУЧАЮТ не фосфатное, а БОРОСИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО. В Карлсруэ построена МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ РАМЕЛА в натуральную величину для отработки режимов эксплуатации оборудования, дистанционного обслуживания и управления процессом. Результаты работы этих двух установок позволят СРАВНИТЬ ПРОЦЕСС РАМЕЛА С ФРАНЦУЗСКИМ ПРОЦЕССОМ АУМ и ВЫБРАТЬ ОДИН ИЗ НИХ ДЛЯ ЗАВОДА WAK в Ваккерсдорфе.

В России разрабатывают ДВА НАПРАВЛЕНИЯ ОСТЕКЛОВАНИЯ ЖИДКИХ ОТХОДОВ: ДВУХ- И ОДНОСТАДИЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ. При реализации ДВУХСТАДИЙНОГО ПРОЦЕССА обезвоживание и кальцинацию проводят при температуре 600-650 °С в аппарате с кипящим слоем мелкозернистого материала, а плавление стекла – в керамическом тигле при температуре до 1200 °С (рис. 7.7). ПРИ ОДНОСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ операции сушки, кальцинации и плавки проводят в одном аппарате (рис. 7.8). На опытных установках проведена варка стекла в металлических тиглях с индукционным нагревом и в электропечах.



1 – трубчатый теплообменник; 2 – калорифер; 3 – сушилка; 4 – фильтр МКФ; 5 – тарельчатый пневмопитатель; 6 – ресивер; 7 – бачок; 8 – барботажно-абсорбционная колонна; 9 – фильтр грубой очистки; 10 – дымовая труба; 11 – фильтр тонкой очистки; 12 – вакуум-насос; 13 – тележка с тиглем; 14 – тигель; 15 – подъемник; 16 – монжюс; 17 – насос; 18 – выпарной аппарат; 19 – емкость упаренного раствора; 20 – насос-дозатор

Рис. 7.7. Схема установки КС-КТ-100



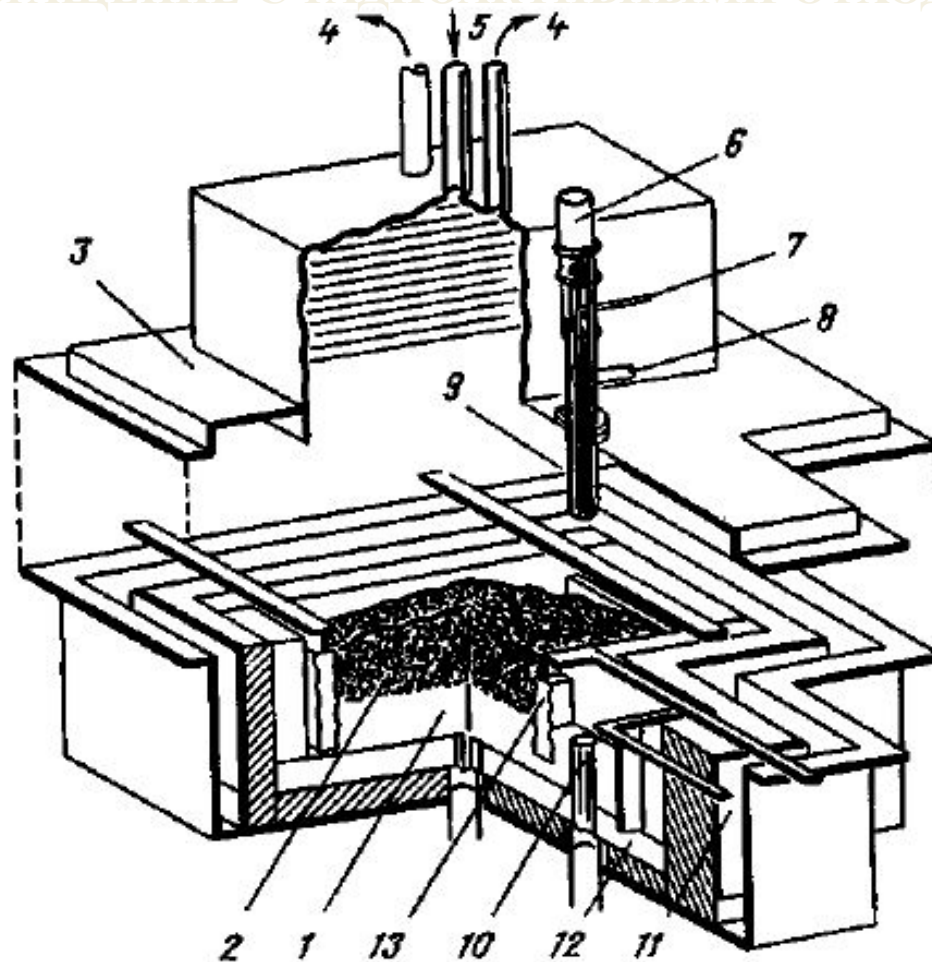
1 – электропечь; 2 – барботер-конденсатор; 3 – фильтр грубой; 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – колонна с пиролюзитом; 6 – абсорбционная колонна

Рис. 7.8. Схема установки остекловывания отходов

Проводится изучение процесса остекловывания с варкой фосфатного и боросиликатного стекла. Одностадийный процесс осуществлен в укрупненно-лабораторном и демонстрационном масштабе при производительности установки $100 \text{ дм}^3/\text{ч}$ по исходному раствору.

В США изучение процесса остекловывания проводят **ПУТЕМ ПЛАВКИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**, в керамической плавильной печи или в тигле, который предполагается затем использовать в качестве контейнера для хранения отходов. Эти **ПЛАВИЛЬНЫЕ АППАРАТЫ МОГУТ РАБОТАТЬ СОВМЕСТНО С КАЛЬЦИНАТОРАМИ** распылительного типа и с кипящим слоем. На основании полученных экспериментальных результатов **ПРИЗНАНО ПЕРСПЕКТИВНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**, близких к плавильным установкам, применяемым в стекольной промышленности (рис. 7.9).

Для этих установок выявляют **ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДАЧИ ОТХОДОВ непосредственно В ЖИДКОМ ВИДЕ ИЛИ В ВИДЕ КАЛЬЦИНАТА**, перспективные конструкционные материалы и материалы для изготовления электродов, отработывают режимы включения и выключения печи, контроля за скоростью плавки и изучают способы дистанционного управления работой установки.



1 – расплав стекла; 2 – порция порошкообразного материала; 3 – крышка контейнера плавителя; 4 – вывод газа; 5 – ввод кальцината и стеклофритты; 6 – цилиндр, регулирующий положение пробки; 7, 8 – ввод и выход охлаждающей жидкости; 9 – пробка сливного отверстия; 10 – сливная труба; 11 – охлаждающая пластина; 12 – стенка контейнера из тугоплавкого оксида хрома; 13 – электроды

Рис. 7.9. Схема керамической плавильной печи

По результатам исследований принято решение на всех установках в США (см. табл. 7.10) **ИСПОЛЬЗОВАТЬ ОДНОСТАДИЙНЫЙ ПРОЦЕСС ПЛАВЛЕНИЯ СТЕКЛА В КЕРАМИЧЕСКОМ ПЛАВИТЕЛЕ.** Плавитель установки DWPF (Defense Waste Processing Facility) имеет производительность 1500 кг стеклопродукта в 1 сут при времени удержания отходов в плавителе в среднем 2 сут. Рабочая температура в плавителе около 1150 °С, электроды изготовлены из инконеля. На этой установке так же, как и на заводе WVDP (Waste Vitrification Demonstration Plant), а также на установке в Вест-Вэлли, отходы будут подаваться в плавитель в виде шлама или упаренного концентрата. Все отходы (2200 м³), хранящиеся на площадке остановленного завода в Вест-Вэлли, предполагается перевести в стекло.

Из процессов, прошедших стадию демонстрационных испытаний на активных растворах, следует упомянуть **КАНАДСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛОПРОДУКТОВ ИЗ ОТХОДОВ ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ТОПЛИВА ТЯЖЕЛОВОДНОГО РЕАКТОРА И ПРИРОДНОГО НЕФЕЛИНОВОГО СИЕНИТА. СТЕКЛОПРОДУКТЫ,** полученные смешением жидких отходов с минералом и известью с последующей сушкой образовавшегося геля при 900 °С и плавлением стекла при 1350 °С, оказались стойкими в химическом, механическом и радиационном отношении и **ПРАКТИЧЕСКИ НЕ ИЗМЕНИЛИ ЗА 20 ЛЕТ ХРАНЕНИЯ СВОИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ СВОЙСТВ.**

Для изучения процессов остекловывания в Канаде строится установка **WIPE** (Waste Immobilization Process Experiment) производительностью 10 кг/ч по стеклопродукту.

В Японии в результате изучения нескольких вариантов отверждения ВАО (остекловывание в керамическом плавителе или в печи с индукционным нагревом, прокаливание в аппаратах с кипящим слоем или во вращающихся барабанах, использование цеолитов в качестве стеклообразующих добавок, включение ВАО в минералоподобную **МАТРИЦУ СИНРОК** или включение стекла в металлическую матрицу) **ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ ОТХОДОВ** завода в Токай-Мура отдано **ПРЕДПОЧТЕНИЕ** способу остекловывания в **керамическом плавителе**. Для реализации этого способа создана установка **VPP** (Vitrification Pilot Plant).

В Японии разработан также **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ ВАО В БОРОСИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО**. В этом процессе **РАСТВОР СИЛИКАТА НАТРИЯ ДОБАВЛЯЕТСЯ К** азотнокислым, нейтрализованным или денитрированным **ЖИДКИМ ВАО**, при этом протекает гелеобразование. Затем **ВВОДИТСЯ V_2O_5** , **СМЕСЬ ПОДВЕРГАЕТСЯ СУШКЕ, ПРОКАЛИВАНИЮ И ОТЖИГУ**. Изучение структуры образовавшихся продуктов показало, что **СТЕКЛО ОБРАЗУЕТСЯ УЖЕ ПРИ НАГРЕВАНИИ ДО 600 °С**.

Этот **СПОСОБ, НАЗВАННЫЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СИНТЕЗОМ СТЕКЛА** и осуществленный в лабораторном масштабе, **ПОЗВОЛЯЕТ СНИЗИТЬ ЛЕТУЧЕСТЬ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И УМЕНЬШИТЬ КОРРОЗИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АППАРАТОВ.**

Операции обезвреживания, прокаливания и плавления в одном аппарате-тигле с периодическим сливом стекла в контейнер осуществлены на установке **WIP** (Waste Immobilization Plant) в Тарапуре (**ИНДИЯ**). Производительность завода 120 кг/сут, или 4 кг/ч. Такие же небольшие установки планируется построить и в Калпаккаме и в ядерном центре Баба.

В ИТАЛИИ разработан и испытан в лабораторном масштабе **ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОСТЕКЛЫВАНИЯ ОТХОДОВ В ТИГЛЕ**, названный **ESTER-ПРОЦЕССОМ**. Создана небольшая установка для демонстрации этого процесса производительностью 100 дм³ стеклопродукта в неделю.

В США и Японии продолжаются **ПОИСКИ СОСТАВОВ СТЕКЛА ДЛЯ УПРОЩЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВАРКИ СТЕКЛОПРОДУКТОВ И ПОВЫШЕНИЯ ИХ СТОЙКОСТИ**. Так, в Ок-Риджской национальной лаборатории предложено **ВКЛЮЧАТЬ ВАО В СВИНЦОВО-ЖЕЛЕЗО-ФОСФАТНОЕ СТЕКЛО**.

Это стекло в 1000 раз более стойко к выщелачиванию, чем боросиликатное, и имеет температуру плавления на 150-200 °С ниже, чем боросиликатное.

Проведенное российскими, французскими и американскими специалистами изучение поведения **БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ** при их хранении на протяжении разных промежутков времени показало, что эти стекла **ХОРОШО СОХРАНЯЮТ СВОИ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА, ЕСЛИ ТЕМПЕРАТУРА ПО ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОСИ БЛОКА НЕ ПРЕВЫШАЕТ 500-600 °С, Т.Е. НЕ ПРЕВЫШАЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ.**

УВЕЛИЧИТЬ НАДЕЖНОСТЬ ХРАНЕНИЯ ОСТЕКЛОВАННЫХ ВАО можно несколькими способами. Например, для хранения стекла применяют **КОЛЬЦЕВЫЕ КОНТЕЙНЕРЫ ИЛИ КОНТЕЙНЕРЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ.** Это повышает эффективную теплопроводность блока и снижает температуру в центральной части контейнера. Можно **ПРОВОДИТЬ КОНТРОЛИРУЕМУЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ СТЕКЛА СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКОЙ ДЛЯ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЕГО В СТЕКЛОКЕРАМИКУ.** Эффективным также является **ВКЛЮЧЕНИЕ НЕБОЛЬШИХ ЧАСТИЦ СТЕКЛА В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ,** например на основе свинца.

Наряду с остекловыванием, разрабатывают и другие методы отверждения ВАО с целью получения термодинамически более стойких, чем стекло, продуктов, способных сохранять в течение длительного времени механическую прочность и химическую стойкость. К таким отходам относятся **СТЕКЛОКЕРАМИКА**, условия производства которой и свойства изучают в Германии, США и Японии, а также различные виды **МИНЕРАЛОПОДОБНОЙ КЕРАМИКИ – СУПЕРКАЛЬЦИНАТЫ, СИНРОК** и др., свойства и способы получения которых исследуют в США и Австралии, Великобритании и Японии.

ТЕРМИТНЫМ СПОСОБОМ (США, Германия) и **МЕТОДОМ ПРЕССОВАНИЯ** при высокой температуре и давлении неорганических ионообменных материалов с адсорбированными из раствора ВАО радионуклидами **ПОЛУЧАЮТ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПРОДУКТЫ** (США, Швеция).

Для повышения **БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНЕНИЯ ГРАНУЛ КАЛЬЦИНАТА ИЛИ ШАРИКОВ СТЕКЛА** предполагают **ВКЛЮЧАТЬ ИХ В** различные **МАТРИЦЫ** или **ПОКРЫВАТЬ ОБОЛОЧКАМИ ИЗ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА, МЕТАЛЛА, КАРБИДА КРЕМНИЯ** (США, Австрия).

Многие из предлагаемых материалов, такие, как **КЕРМЕТЫ**, **МИНЕРАЛОПОДОБНАЯ КЕРАМИКА**, **ВИТРОМЕТ** и т.п., **ЯВЛЯЮТСЯ ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ФОРМАМИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ВАО**, однако **ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТЫ ЗНАЧИТЕЛЬНО СЛАБЕЕ, ЧЕМ ДЛЯ ОСТЕКЛОВАНИЯ**. Производство витромета освоено, как уже упоминалось, в полупромышленном масштабе на модельных и реальных отходах. В Австралии построена установка для испытания **ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНРОКА (СИНТЕТИЧЕСКОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ)** производительностью 10 кг/ч. Установка работает на неактивных модельных растворах. **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНРОКА** включает следующие **ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ: СМЕШИВАНИЕ ВАО СВОДНОЙ СУСПЕНЗИЕЙ**, содержащей порошкообразные TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , CaO и BaO, **ОБЕЗВОЖИВАНИЕ, СУШКА, ДЕНИТРАЦИЯ И ПРОКАЛИВАНИЕ СМЕСИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КАЛЬЦИНАТОРЕ** при температуре около 750 °С, **ДОБАВЛЕНИЕ К МИНЕРАЛИЗОВАННОМУ ПРОДУКТУ ПОРОШКА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА** до 2 % мас. и горячее и/или холодное **ПРЕССОВАНИЕ ПРОДУКТА** в специальных пресс-формах **С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОТЖИГОМ** при ~1200 °С.

По контракту с КАЭ Австралии японские специалисты принимают участие в отработке режимов эксплуатации оборудования и технологических процессов изготовления синрока, а в изучении характеристик продукта, в частности радиационной стойкости и химической стабильности, будут участвовать английские специалисты из Харуэлла. В Австралии строится также лабораторная установка для включения в синрок реальных отходов.

ОХАРАКТЕРИЗОВАТЬ количественно важнейшие **СВОЙСТВА ОТВЕРЖДЕННЫХ ПРОДУКТОВ** можно **НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ О СКОРОСТИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, О ТЕМПЕРАТУРЕ НАЧАЛА РАЗМЯГЧЕНИЯ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПЛАВЛЕНИЯ**. В табл. 7.11 приведены основные характеристики отвержденных продуктов.

Из таблицы видно, что **СВОЙСТВА ИЗМЕНЯЮТСЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЗНАЧЕНИЙ**. Это объясняется **РАЗЛИЧИЕМ В СОСТАВАХ И СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПРОДУКТОВ**, а также **ОТСУТСТВИЕМ ЕДИНОЙ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ УКАЗАННЫХ СВОЙСТВ**. Первые шаги на пути стандартизации методик определения скорости выщелачивания отвержденных продуктов предприняты МАГАТЭ и восточно-европейскими странами.

Таблица 7.11. Сравнение свойств отвержденных продуктов

Свойство	Кальцинат	Стекло	Керамика	Кермет	Кальцинат в графитовой матрице
Теплопроводность, Дж/(см·с·град)	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$ $1,68 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$ -0,21	2,1-0,21	$2 \cdot 10^{-2}$ $4,2 \cdot 10^{-2}$
Скорость выщелачивания, г/(см²·сут)	50-95 %	10^{-5} - 10^{-7}	10^{-5} - 10^{-8}	10^{-5} - 10^{-7}	10^{-4} - 10^{-7}
Верхний предел термической стабильности, °С	~700	500-900	600-1500	300-1200	600-1500
Верхний предел радиационной стабильности к α-, β-, γ-излучению, Гр	$>10^{10}$	$>10^{10}$	$> 10^{12}$	$>10^{12}$	$>10^{10}$
Увеличение объема продукта по отношению к объему кальцината, %	—	20-50	20-80	20-100	30-150

7.3.1. Проблема трансурановых элементов

Время снижения активности ВАО до уровня естественного фона определяется периодами полураспада наиболее долгоживущих радионуклидов – актиноидов – и составляет десятки тысяч лет. С этим связана особая ответственность нашего поколения перед будущими в решении вопроса обращения с отходами, содержащими долгоживущие α -излучатели.

НАИБОЛЕЕ НАДЕЖНЫМ СПОСОБОМ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ от биосферы в настоящее время ПРИЗНАНО ЗАХОРОНЕНИЕ ИХ В ГЛУБОКИЕ УСТОЙЧИВЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ. Однако этот способ вызывает опасения в связи с неопределенностью поведения через тысячи лет как самих отходов, так и вмещающих пород. Прогноз сохранения постоянства геологических, геохимических и гидрогеологических характеристик вмещающих пород с высокой степенью вероятности возможен по разным оценкам лишь на 400-1000 лет. Не более чем на такой срок возможна оценка поведения и самих радиоактивных отходов. Кроме того, не все страны, развивающие ядерную энергетику, имеют на своих территориях подходящие геологические формации.

Поэтому уже теперь **ПРОВОДЯТСЯ РАБОТЫ ПО ИЗЫСКАНИЮ ДРУГИХ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ВОПРОСА.** Один из возможных путей – **ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ВАО ПЕРЕД ОТВЕРЖДЕНИЕМ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ НИХ ФРАКЦИЙ АКТИНОИДОВ И ДРУГИХ ДОЛГОЖИВУЩИХ НУКЛИДОВ.** Разработки таких процессов активно проводятся в России, США, Франции, Германии и других странах.

НЕКОТОРЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ, содержащиеся в ВАО, **МОГУТ БЫТЬ** в форме источников излучения **ИСПОЛЬЗОВАНЫ** в различных областях техники. Например, ^{137}Cs – **В ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ,** ^{90}Sr – **В ИСТОЧНИКАХ ТОКА,** ^{241}Am – **В ДЕТЕКТОРАХ ДЫМА И В КАЧЕСТВЕ ЗАПАЛЬНИКОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК.** **ПЛАТИНОВЫЕ МЕТАЛЛЫ** могут быть использованы **В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРОВ.** Поэтому в России, США и других странах разрабатываются **ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВАО С ЦЕЛЬЮ ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ НИХ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ** и изучаются возможности их использования.

Для извлечения трансурановых элементов наиболее типичной является **ТРЕХСТАДИЙНАЯ СХЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ВАО:** **ДОИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ ВАО ОСТАТКОВ U, Pu И Np, ВЫДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИИ, СОДЕРЖАЩЕЙ СУММУ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И ТРАНСПЛУТОНИЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,** и **ГРУППОВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ РЗЭ И ТПЭ.**

Процессы извлечения и разделения основываются на селективной экстракции, сорбции и комплексообразовании, причем в разных схемах используют разные комбинации этих методов и разные реагенты.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ, прежде всего, ПОЛНОТОЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ АКТИНОИДОВ. ПОЛНОТА ИЗВЛЕЧЕНИЯ принятым методом **ЗАВИСИТ ОТ СОСТОЯНИЯ АКТИНОИДОВ В РАСТВОРЕ**, а также **ОТ СТЕПЕНИ УДЕРЖИВАНИЯ ИХ В ОСТАТКАХ**, образовавшихся при хранении ВАО или **ПРИ ОПЕРАЦИЯХ СНИЖЕНИЯ КИСЛОТНОСТИ ВАО**, характерной для многих схем переработки. Проведенные в этой связи в Италии и Японии исследования показали, что **КОМБИНИРОВАННОЕ ДЕЙСТВИЕ** вводимой для денитрации отходов **МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТЫ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**, всегда присутствующих в ВАО, во многих случаях **ОБЕСПЕЧИВАЕТ** практически **КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПЕРЕВОД В РАСТВОР** адсорбированных осадком **АКТИНОИДОВ**, а часто и **ДЕПОЛИМЕРИЗАЦИЮ ПЛУТОНИЯ**. В то же время частичная **ДЕНИТРАЦИЯ ВАО** позволяет предварительно **ВЫДЕЛИТЬ В ОСАДОК** некоторые **ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ** (молибден, цирконий, теллур), что облегчает последующее экстракционное выделение актиноидов и лантаноидов.

МНОГИЕ ИЗ РАЗРАБОТАННЫХ СХЕМ ХАРАКТЕРИЗУЮТСЯ БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ ОПЕРАЦИЙ, ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХ ЭКСТРАГЕНТОВ ИЛИ СОЧЕТАЮТ ЭКСТРАКЦИОННЫЕ И ИОНООБМЕННЫЕ МЕТОДЫ. Наиболее активно разрабатывают **ЭКСТРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ.** При этом в зависимости от кислотности отходов предложено использовать **ТБФ, ТОФО (триоктилфосфиноксид), ДББФ (дибутил-бутилфосфонат), гидроксамовые кислоты, бифункциональные экстрагенты, например ДБДЭКМФ (дибутил-N, N-диэтилкарбамилметилден-фосфонат), ДИДФК (диизодецилфосфорная кислота), Д2ЭГФК (ди-2-этилгексилфосфорная кислота), четвертичные аммониевые основания.** Для отделения актиноидов от лантаноидов предлагается анионообменная, катионообменная или экстракционная хроматография с **Д2ЭГФК** или экстракция этим же экстрагентом, причем внутригрупповое разделение основано, на различиях в прочности комплексов актиноидов и лантаноидов с **ДТПА (диэтилтриаминпентауксусная кислота).** **НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ,** по-видимому, следует **СЧИТАТЬ СХЕМУ С ТБФ.** Она предусматривает два возможных варианта, выбор которых зависит от поведения плутония в процессе хранения отходов и его распределения между раствором и осадком.

ЕСЛИ ПЛУТОНИЙ СОДЕРЖИТСЯ в растворе полностью **В ЭКСТРАГИРУЕМОМ СОСТОЯНИИ**, то рекомендуется следующий **ПОРЯДОК ОПЕРАЦИЙ: ОСВЕТЛЕНИЕ ОТХОДОВ** с целью удаления осадков продуктов деления; **ЭКСТРАКЦИЯ** ТБФ урана, плутония и нептуния из раствора, имеющего кислотность 4-5 М HNO_3 ; частичная **ДЕНИТРАЦИЯ** водного рафината муравьиной кислотой до 1 М HNO_3 ; **КОРРЕКТИРОВКА СОСТАВА РАСТВОРА ПО КИСЛОТНОСТИ И СОЛЕСОДЕРЖАНИЮ** введением нитрата алюминия или натрия для обеспечения эффективной экстракции актиноидов и лантаноидов; **ЭКСТРАКЦИЯ** с помощью ТБФ **СУММЫ АКТИНОИДОВ И ЛАНТАНОИДОВ**; **РЕЭКСТРАКЦИЯ** суммы лантаноидов и актиноидов с помощью ДТПА и, наконец, **РАЗДЕЛЕНИЕ АКТИНОИДОВ И ЛАНТАНОИДОВ** экстракцией последних с помощью Д2ЭГФК.

ЕСЛИ ПЛУТОНИЙ ЧАСТИЧНО АДСОРБИРОВАЛСЯ НА ВЫПАВШЕМ ИЗ ОТХОДОВ ОСАДКЕ ИЛИ НАХОДИТСЯ В РАСТВОРЕ В ПОЛИМЕРИЗОВАННОЙ НЕЭКСТРАГИРУЕМОЙ ФОРМЕ, предусматривается **СНАЧАЛА ПРОВЕДЕНИЕ ОПЕРАЦИИ ДЕНИТРАЦИИ** отходов **МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТОЙ** до 1 М HNO_3 , которая позволяет **ПЕРЕВЕСТИ** весь **ПЛУТОНИЙ В ЭКСТРАГИРУЕМУЮ ФОРМУ**.

После осветления раствора проводят **ЭКСТРАКЦИЮ УРАНА, ПЛУТОНИЯ И НЕПТУНИЯ ТБФ**, а водный **РАФИНАТ** поступает **НА СТАДИЮ КОРЕКТИРОВКИ СОСТАВА РАСТВОРА** для последующей групповой экстракции лантаноидов и актиноидов. Порядок операций, начиная от корректировки состава раствора, аналогичен первому варианту.

НЕДОСТАТКИ этой **СХЕМЫ: НАЛИЧИЕ ВТОРОГО ЭКСТРАГЕНТА (Д2ЭГФК), ВВЕДЕНИЕ ВЫСАЛИВАТЕЛЕЙ**, увеличивающих количество вторичных отходов, а также **НЕОБХОДИМОСТЬ РАБОТЫ С ОСАДКАМИ**.

В Ок-Ридже (США) разработана **СХЕМА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСТРАКЦИИ ДБДЭКМФ ДЛЯ ГРУППОВОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ АКТИНОИДОВ И ЛАНТАНОИДОВ И КАТИОНООБМЕННОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ ФРАКЦИИ АМЕРИЦИЯ И КЮРИЯ ОТ РЗЭ**. Особенность схемы – отсутствие операций снижения кислотности или денитрации, благодаря чему рафинат I цикла экстракции из PUREX-процесса может практически без обработки поступать на экстракцию ДБДЭКМФ. Единственной операцией подготовки раствора является его осветление (если в ВАО при хранении успели образоваться осадки) и введение нитрата кадмия (0,136 М) или гадолиния в раствор для обеспечения ядерной безопасности.

ВСЕ РАЗРАБОТАННЫЕ СХЕМЫ ПРОШЛИ ЛИШЬ СТАДИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПОДТВЕРДИВШИХ ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ. Однако некоторые вопросы еще требуют проведения дополнительных исследований. Среди них вопросы радиационной стойкости и способов очистки экстрагентов, выбор экстракционного оборудования и режимов экстракции, детальное изучение взаимодействия азотной и муравьиной кислот, вопросы коррозии оборудования и контроля достижения необходимой кислотности, вопросы ядерной безопасности при обращении с чистыми растворами трансплутониевых элементов, очистка америция и кюрия от комплексообразующих агентов.

В США, Италии и других странах рассматривают **ВОЗМОЖНОСТЬ ДАЛЬНЕЙШЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ВЫДЕЛЕННЫХ ФРАКЦИЙ В РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ ИЛИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ.** По предполагаемой схеме **ТРАНСПЛУТОНИЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ФОРМЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ ВВОДЯТ В АКТИВНЫЕ ЗОНЫ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА ИЛИ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ.** Фракция продуктов деления может быть размещена также в бланкете термоядерного реактора. Редкоземельные элементы после отделения их от ТПЭ и друг от друга могут быть использованы для любых технических или научных целей. При осуществлении такой схемы можно полагать, что безопасность захоронения отходов повысится.

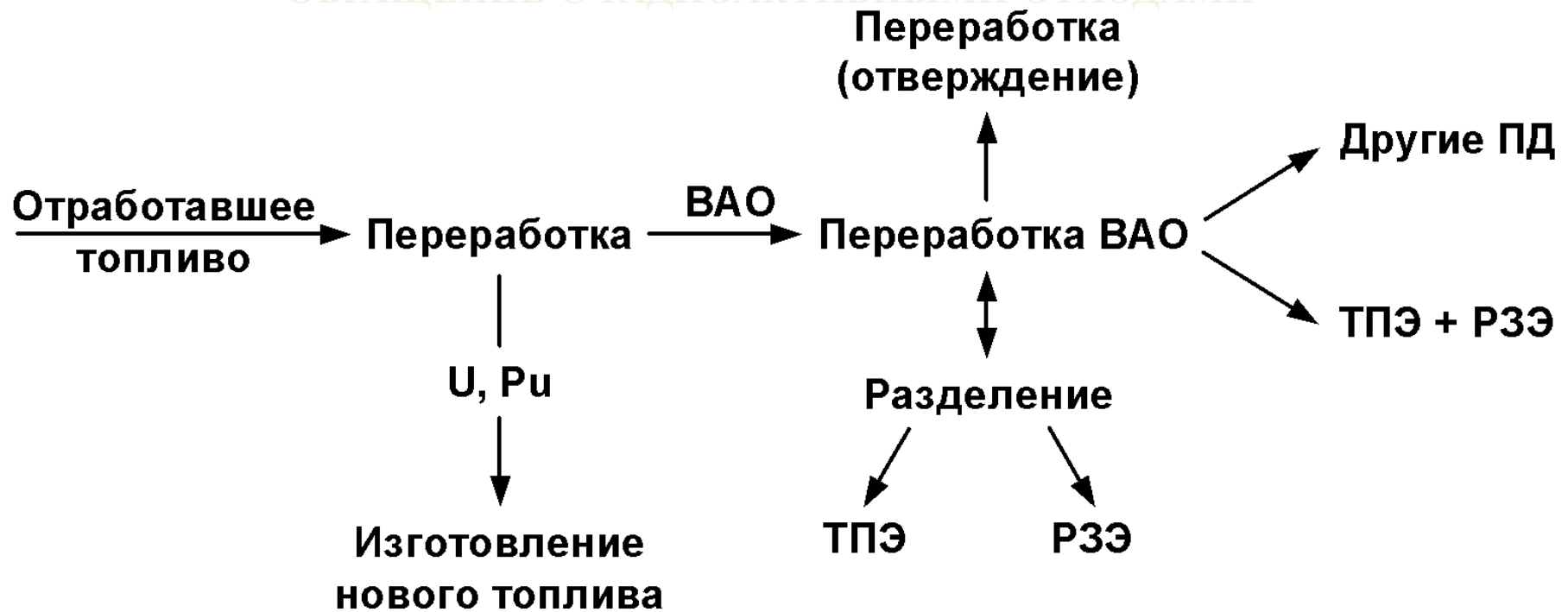


Рис. 7.10. Принципиальная схема переработки ВАО

7.4. Жидкие отходы среднего и низкого уровня активности

К СРЕДНЕАКТИВНЫМ (САО) И НИЗКОАКТИВНЫМ (НАО) отходам ОТНОСЯТСЯ:

– СБРОСНЫЕ ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ ПОСЛЕ II И III ЦИКЛОВ ОЧИСТКИ УРАНА И ПЛУТОНИЯ,

– СБРОСНЫЕ ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ УЗЛОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОНЕЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ В ТВЕРДОЙ ФОРМЕ,

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

- НЕЙТРАЛИЗОВАННЫЕ ПРОМЫВНЫЕ РАСТВОРЫ УЗЛА ОЧИСТКИ ЭКСТРАГЕНТА,
- КУБОВЫЕ ОСТАТКИ УЗЛОВ РЕГЕНЕРАЦИИ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ,
- РАСТВОРЫ ОТ ДЕЗАКТИВАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ, АРМАТУРЫ, КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ПОМЕЩЕНИЙ ГОРЯЧИХ ЗОН,
- РАСТВОРЫ ИЗ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ОХЛАЖДАЮЩИХ ВОД БАССЕЙНОВ ХРАНИЛИЩ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА, БЫТОВЫЕ ВОДЫ ИЗ ДУШЕВЫХ И ПРАЧЕЧНЫХ, СБРОСЫ ИЗ ЛАБОРАТОРИЙ, ОРГАНИЧЕСКИЕ РАСТВОРЫ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ ОТРАБОТАВШИЙ ЭКСТРАГЕНТ.

Для завода производительностью 1500 т/год количество жидких САО составит 50-150 м³/сут, а НАО – 500-1500 м³/сут. САО и НАО характеризуются помимо большого объема разнообразием составов.

Технологический **ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ СРЕДНЕГО И НИЗКОГО УРОВНЕЙ АКТИВНОСТИ СОСТОИТ** обычно **ИЗ ДВУХ ЭТАПОВ. ЦЕЛЬ ПЕРВОГО ЭТАПА** – сокращение объемов отходов с одновременным получением небольшого объема концентрата отходов и основного потока очищенных вод, которые можно вновь использовать в производстве или направлять в водосток.

НА ВТОРОМ ЭТАПЕ осуществляют переработку концентрата отходов для превращения его в твердый продукт, предназначенный для захоронения или долговременного хранения в контролируемых хранилищах.

ПРИ ВЫБОРЕ НАИБОЛЕЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО И ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНОГО СПОСОБА СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМОВ ОТХОДОВ ПРИНИМАЮТ ВО ВНИМАНИЕ КОЛИЧЕСТВО ЖИДКИХ ОТХОДОВ, ИХ ХИМИЧЕСКИЙ И РАДИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, УРОВЕНЬ СУММАРНОЙ АКТИВНОСТИ, ВОЗМОЖНОСТЬ ВОЗВРАТА ОТХОДОВ НА ПОВТОРНУЮ ОБРАБОТКУ, ПРИСУТСТВИЕ В ЖИДКИХ ОТХОДАХ ВЗВЕСЕЙ. Для переработки жидких САО и НАО используют фильтрацию, соосаждение и коагуляцию осадков и взвесей, ионный обмен и упаривание растворов. Разрабатывают и другие методы обработки радиоактивных отходов, такие, как осмос и обратный осмос, электродиализ и т.п. Однако эти способы еще не нашли широкого применения в промышленном масштабе.

ФИЛЬТРАЦИЮ радиоактивных стоков редко применяют **КАК САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ СПОСОБ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОТХОДОВ**, но она является составной частью при очистке отходов другими методами, например, может предшествовать ионному обмену или завершать очистку методом осаждения.

МЕТОД ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТХОДОВ с помощью осаждения прост, достаточно дешев и наиболее эффективен в том случае, когда общее содержание солей относительно велико. Если химический и радиохимический состав растворов отходов известен и постоянен, то удачным подбором химических реагентов-осадителей можно добиться очистки с коэффициентом до 10^3 . Однако этот метод не обеспечивает высокой степени концентрирования радионуклидов.

ИОНООБМЕННЫЕ МЕТОДЫ очистки нашли наибольшее применение для отходов с низким содержанием солей ($< 1 \text{ г/дм}^3$), например, для очистки охлаждающих вод в бассейнах-хранилищах облученного топлива. **ДОСТОИНСТВА МЕТОДА** – простота оборудования, высокие коэффициенты сокращения объема радиоактивных сбросов и концентрирование радиоактивных продуктов в форме, легко поддающейся отверждению и удалению. Применение этого метода позволяет достигать коэффициентов очистки от 10 до 10^4 , в среднем 10^2 - 10^3 при коэффициенте сокращения объема отходов от 500 до 10^4 . Основной **НЕДОСТАТОК МЕТОДА ИОННОГО ОБМЕНА** заключается в высокой стоимости ионообменных смол, особенно синтетических. Его преодолевают регенерацией смол промывкой и поиском дешевых ионообменных материалов.

Большое число исследований посвящено изучению свойств молекулярных сит с морденитовой и шабазитовой структурой, неорганических обменников типа фосфата циркония, гидратированного оксида титана, алюмосиликатов и других для выбора селективных к цезию и стронцию материалов. Изучают также возможности применения ионообменных материалов для извлечения иода.

УПАРИВАНИЕ представляет собой универсальный и широко распространенный, но и наиболее дорогой способ концентрирования САО и НАО, применяемый для обработки отходов со значительной концентрацией солей. За исключением таких радионуклидов, как тритий и некоторые радиоактивные элементы, образующие летучие формы, все вещества отделяются почти количественно. С помощью этого метода достигают высоких коэффициентов очистки порядка 10^3 - 10^5 , иногда они могут возрастать и до 10^6 . Создано много вариантов конструкций аппаратов-испарителей, которые с успехом применяют на всех заводах.

КОНЦЕНТРАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОЧИСТКИ САО И НАО, представляют собой шламы после фильтрации и химической обработки, отработавшие ионообменные смолы, кубовые остатки после упаривания.

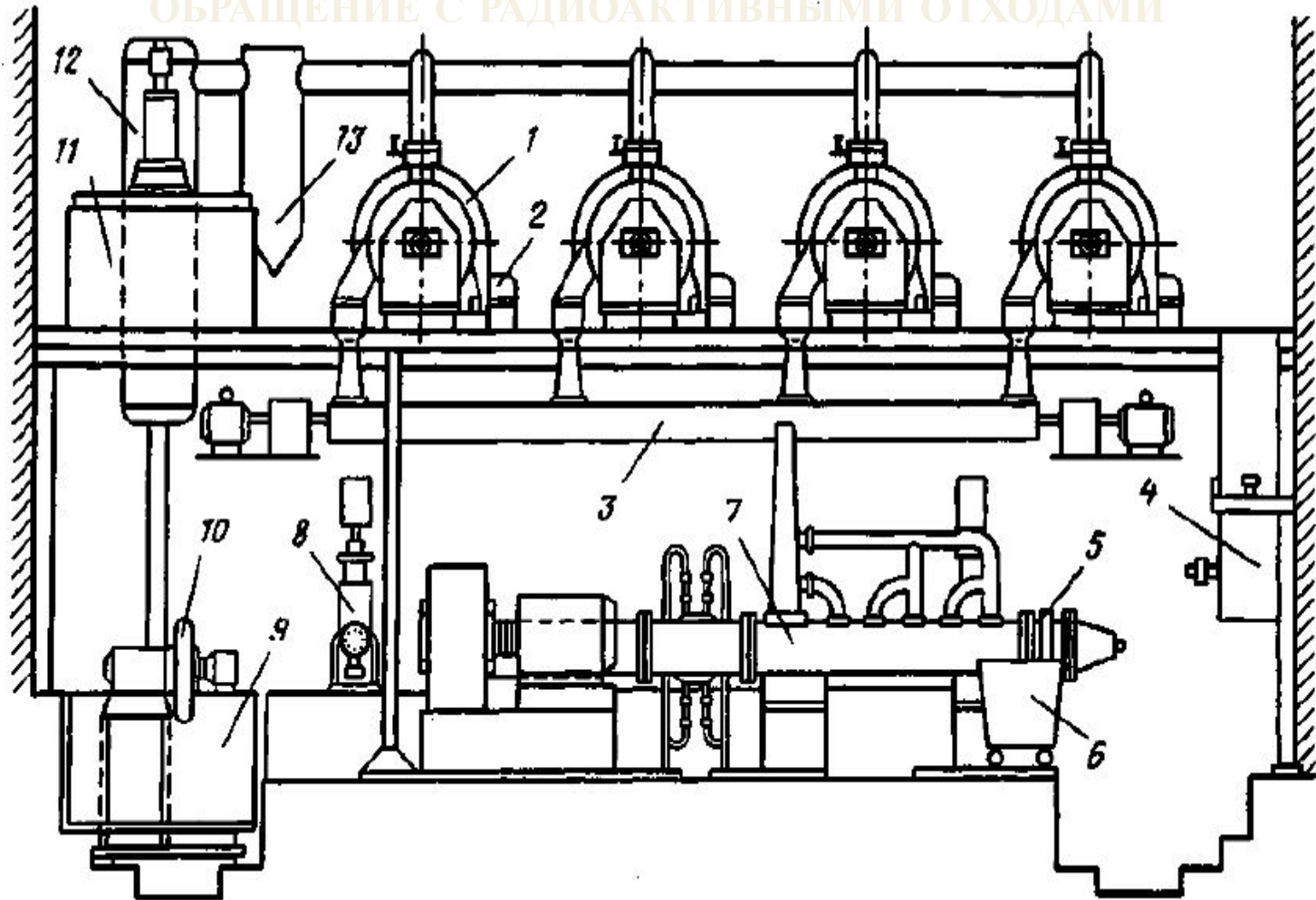
Эти концентраты обычно **ОТВЕРЖДАЮТ С ПОМОЩЬЮ** методов **БИТУМИРОВАНИЯ, ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ И ПОЛИМЕРИЗАЦИИ**, хотя не исключены и другие методы отверждения, например **ВКЛЮЧЕНИЕ ОСАДКОВ**, полученных при переработке САО методом осаждения, **В БОРОСИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО**. Показано, что в 1 кг боросиликатного стекла, содержащего 20 % мас. оксидов ВАО и 10 % Cd_2O_3 , можно ввести без ухудшения свойств осадок от обработки 10 дм³ концентрата САО.

БИТУМИРОВАНИЕ представляет собой один из перспективных способов отверждения, уже применяемый в разных странах. **БИТУМЫ** привлекают внимание такими **ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ КАЧЕСТВАМИ**, как **НЕПРОНИЦАЕМОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ**, достаточная **ХИМИЧЕСКАЯ ИНЕРТНОСТЬ, НЕВЫСОКАЯ СТОИМОСТЬ, НЕЗНАЧИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СО СТОРОНЫ МИКРООРГАНИЗМОВ**. Наряду с достоинствами **МЕТОД БИТУМИРОВАНИЯ** имеет **НЕДОСТАТКИ**, ограничивающие его применение. **ГОРЮЧЕСТЬ БИТУМА** (температура воспламенения около 350-420 °С) ограничивает возможность включения в него нитрит-нитратных отходов и требует учета возможности пожаров и взрывов.

Сравнительно **НИЗКАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ БИТУМНЫХ ПРОДУКТОВ** заставляет уменьшать объемную активность поступающих на битумирование отходов до $(3,7-37) \cdot 10^{10}$ Бк/дм³, хотя чаще концентрирование отходов лимитируется солесодержанием, а не активностью.

Технологические **ПРОЦЕССЫ БИТУМИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ** МОГУТ БЫТЬ ПОДРАЗДЕЛЕНЫ НА ТРИ ГРУППЫ. **ПЕРВАЯ ГРУППА** включает **ПРОЦЕССЫ**, разработанные в Бельгии, Великобритании, России и Германии и предусматривающие **СМЕШИВАНИЕ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С РАСПЛАВЛЕННЫМ БИТУМОМ ПРИ 160-230 °С С ОДНОВРЕМЕННЫМ ВЫПАРИВАНИЕМ ВОДЫ И ВОЗГОНКОЙ ЛЕГКОЛЕТУЧИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИЗ НАГРЕТОГО СЛОЯ БИТУМА.**

В России введена в промышленную эксплуатацию высокопроизводительная непрерывно действующая **УСТАНОВКА УБД-200**, созданная на основе типовой промышленной аппаратуры на Центральной станции радиационной безопасности. Вначале **НА ЭЛЕКТРОБОГРЕВАЕМЫХ ВАЛЬЦОВЫХ СУШИЛКАХ ПОЛУЧАЮТ ВЛАЖНЫЕ СОЛИ**, КОТОРЫЕ ПЕРЕДАЮТ В ШНЕКОВЫЕ СМЕСИТЕЛИ С **МЯГКИМ ПОДОГРЕВОМ ОРГАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ (ДИТОЛИЛ-МЕТАНОМ)**, КУДА ПОСТУПАЕТ ТАКЖЕ РАСПЛАВЛЕННЫЙ **БИТУМ** (рис. 7.11).



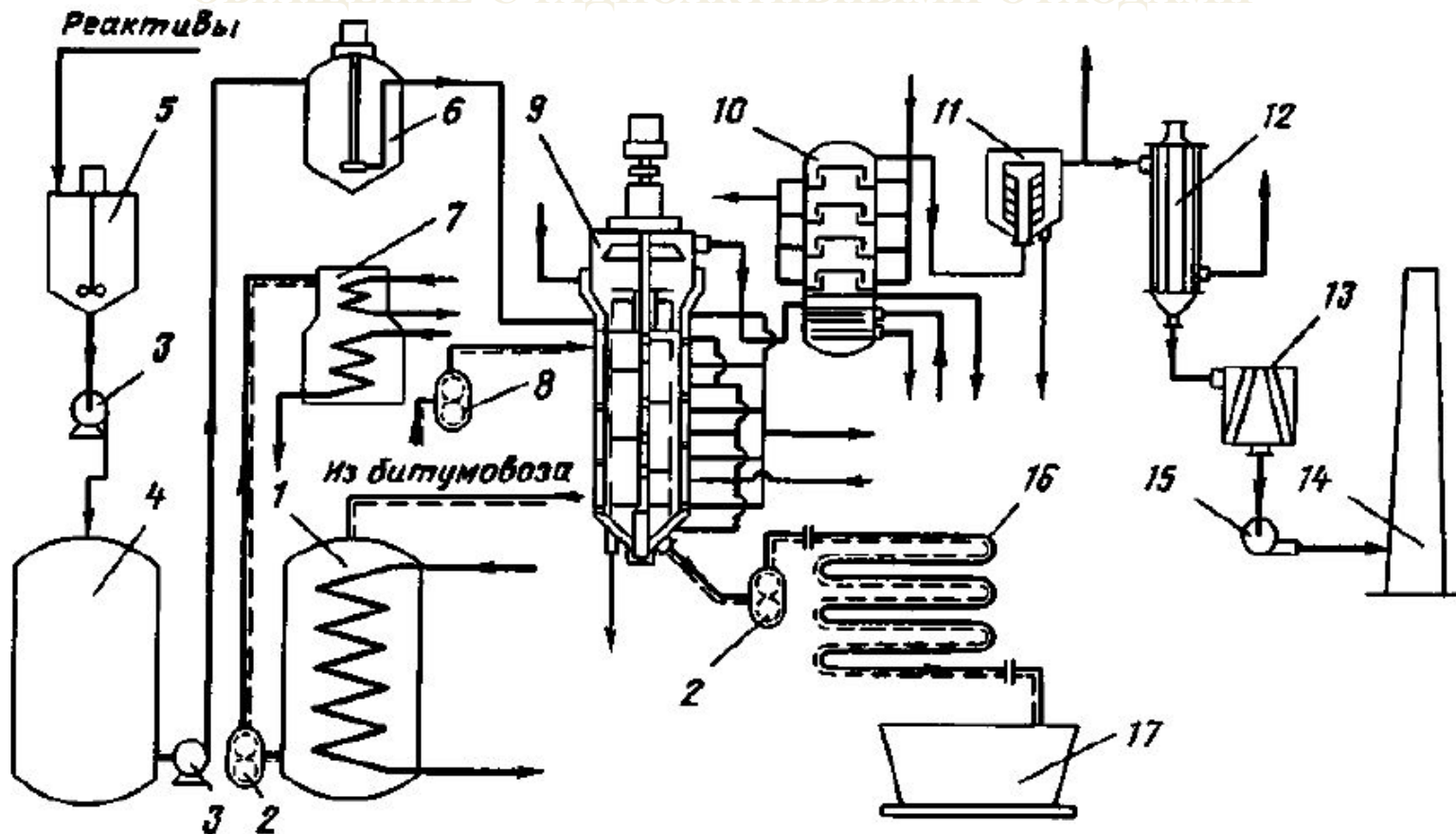
1 – сушилка; 2 – шнек выгрузки соли из сушилки; 3 – шнек подачи соли в смеситель; 4 – хранилище битума; 5 – выдача компаунда; 6 – формующая тележка; 7 – смеситель; 8 – циркуляционный насос для теплоносителя; 9 – сборник конденсата; 10 – вентилятор; 11 – промежуточная емкость; 12 – теплообменник; 13 – пылеуловитель

Рис. 7.11. Схема установки УБД-200

Кроме того, в России разработана **КОНСТРУКЦИЯ РОТОРНОГО БИТУМАТОРА СО СДИРАЕМОЙ ПЛЕНКОЙ** производительностью 500дм³/ч по испаряемой воде. Испарение воды происходит из тонкой пленки смеси жидких отходов и битума, стекающих вниз по обогреваемой цилиндрической стенке аппарата. Перемешивание в пленке осуществляют скребками, закрепленными на вращающемся вертикальном роторе. Скребки интенсифицируют процессы теплообмена и одновременно очищают поверхность нагрева (рис. 7.12).

В Бельгии на заводе в г. Моле перед битумированием проводят химическую обработку САО для того, чтобы перевести все радионуклиды в нерастворимое состояние, что достигается осаждением гидроксидов и сульфата бария для фиксации стронция и ферроцианида никеля для фиксации цезия. Образующуюся взвесь, содержащую 60 % воды и 40 % осадка, непрерывно подают в четырехвалковый экструдер-испаритель.

ВТОРАЯ ГРУППА процессов битумирования основана на технологии, разработанной в США, и **ВКЛЮЧАЕТ СМЕШИВАНИЕ ОТХОДОВ С БИТУМНОЙ ЭМУЛЬСИЕЙ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ, НАГРЕВАНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ СМЕСИ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ И ОТГОНКИ ВОДЫ И ЛЕГКОЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.**



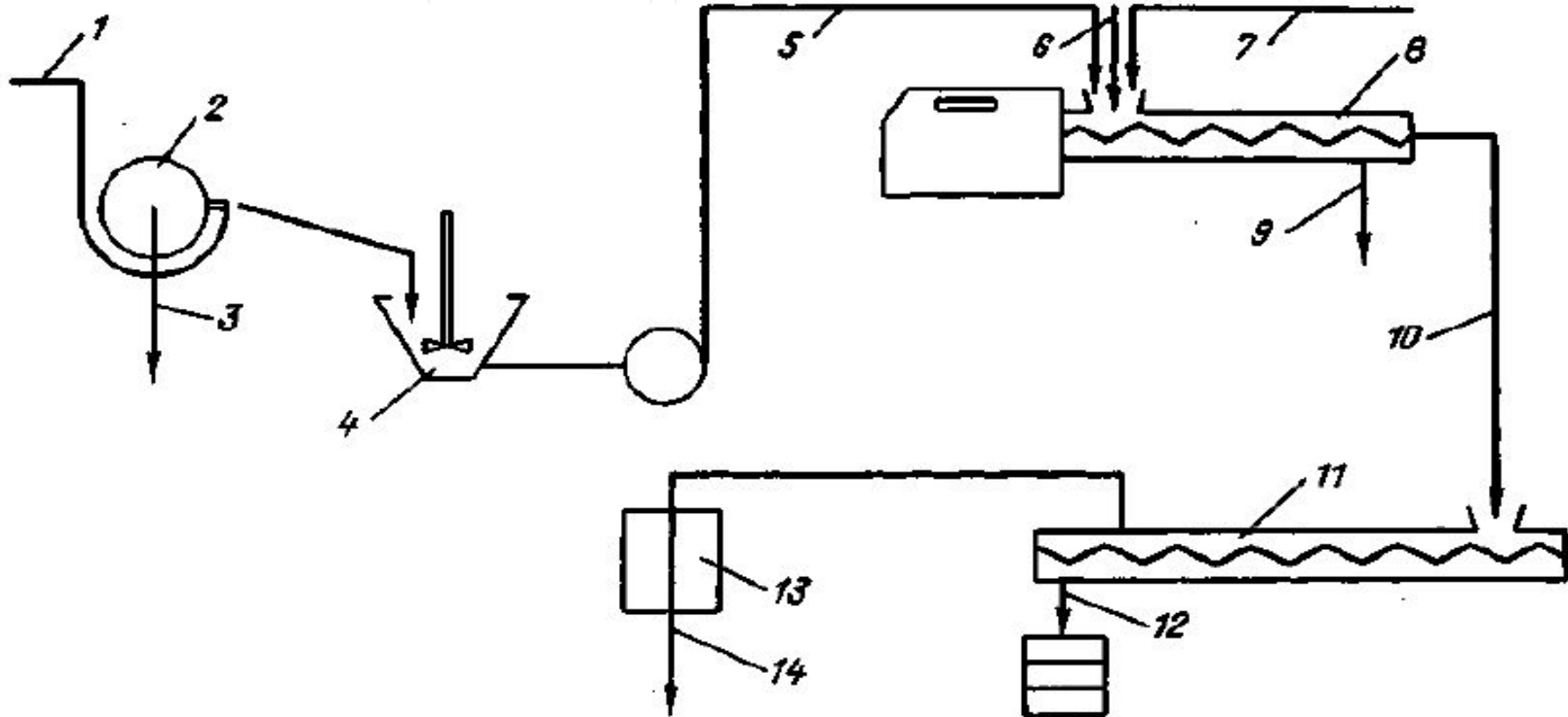
1 – емкость для хранения битума; 2 – битумный насос; 3 – центробежный насос; 4 – емкость для хранения раствора; 5 – узел приготовления раствора; 6 – погружной насос; 7 – емкость для дозирования битума; 8 – насос для дозирования битума; 9 – битуматор РБ-1000-12; 10 – барботажная колонна; 11 – фильтр грубой очистки; 12 – теплообменник; 13 – фильтр тонкой очистки; 14 – сбросная труба; 15 – вакуум-насос; 16 – трубопровод для перекачки битумной смеси; 17 – емкость для битумной смеси

Рис. 7.12. Схема установки битумирования жидких отходов

ТРЕТЬЯ ГРУППА представлена процессом, разработанным во Франции и **ВКЛЮЧАЮЩИМ ОПЕРАЦИИ СМЕШЕНИЯ ШЛАМОВ, РЕАГЕНТОВ** (поверхностно-активных веществ) **И БИТУМА, ОТДЕЛЕНИЯ ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ИЗ БИТУМНОГО МАТЕРИАЛА ВОДЫ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОЛНЫМ ОБЕЗВОЖИВАНИЕМ БИТУМНОЙ МАССЫ** (рис. 7.13). Процесс двухстадийный: смешение шламов с битумом и отжим воды, сушка смеси. В этом процессе поверхностно-активные вещества снижают поверхностное натяжение между водой и битумом. Образующаяся битумная эмульсия нестабильна и почти мгновенно разрушается, после чего из состава удаляют воду. На опытной установке в Маркуле произведено около 3000 м³ радиоактивных битумированных продуктов, которые содержат 50 % солей.

Конечные операции на всех установках битумирования одинаковы: затаривание битумной массы, хранение или захоронение контейнеров с продуктами.

В последнее время разрабатывают процессы, в которых **БИТУМ ЗАМЕНЯЮТ ИСКУССТВЕННЫМИ ПОЛИМЕРАМИ**. Полимеризация протекает, как правило, без нагревания. **МЕТОД ПОЛИМЕРИЗАЦИИ** особенно **УДОБЕН ДЛЯ ФИКСАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ИОНООБМЕННИКОВ**.

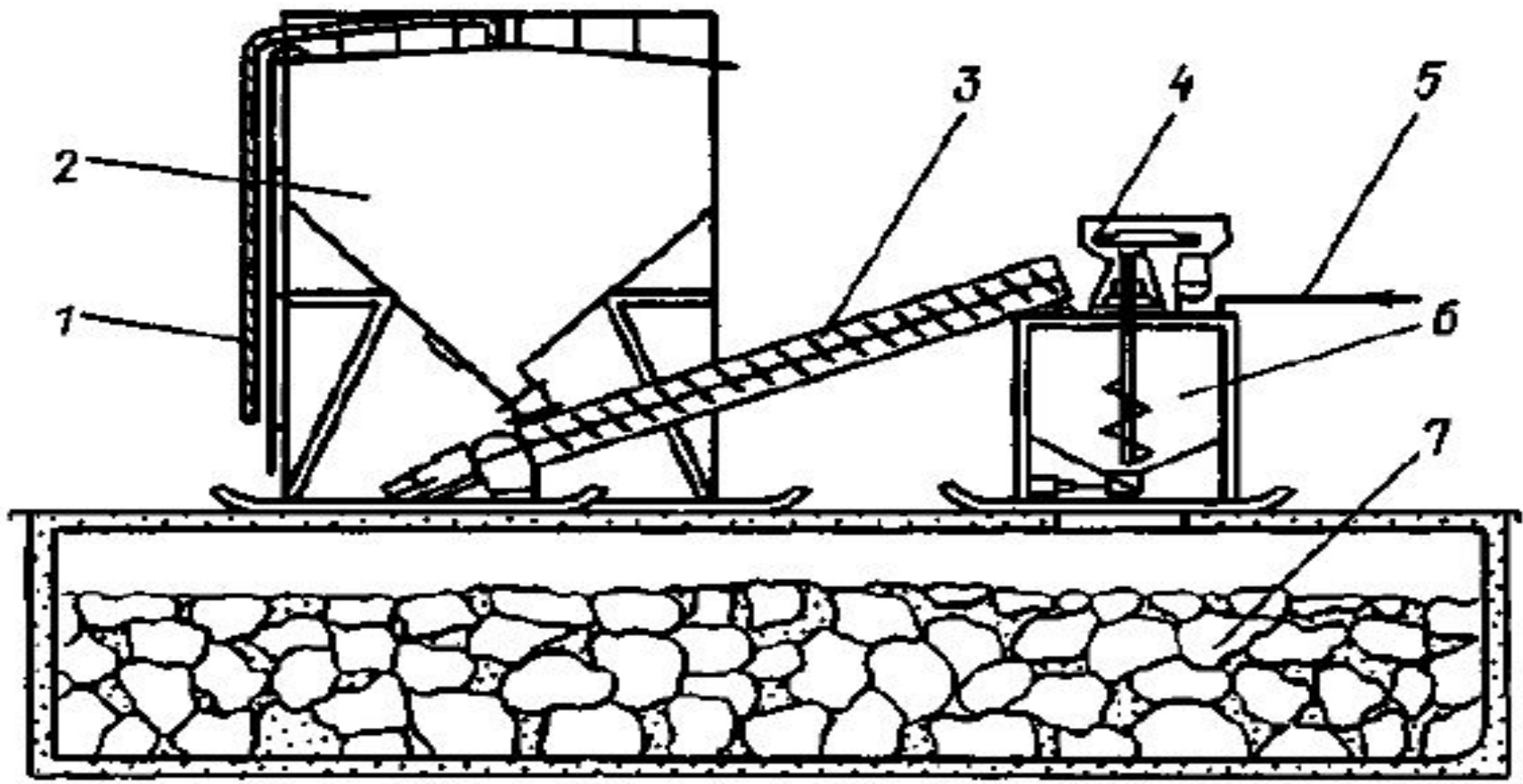


1 – шлам, содержащий 90 % воды; 2 – фильтр; 3 – отфильтрованная вода; 4 – емкость с мешалкой; 5 – шлам, содержащий 50 % воды; 6 – подача поверхностно-активных веществ; 7 – битум; 8 – предварительное покрытие шлама битумом; 9 – отделение воды; 10 – битумная масса, содержащая 8 % воды; 11 – сушка; 12 – выход продукта; 13 – конденсатор; 14 – сконденсированная вода

Рис. 7.13. Схема процесса битумирования отходов, применяемого во Франции

Аппаратура при этом может быть использована та же, что и для битумирования. **ПОЛИМЕРНЫЕ ПРОДУКТЫ ОБЛАДАЮТ** по некоторым параметрам **ЛУЧШИМИ ПО СРАВНЕНИЮ С БИТУМОМ СВОЙСТВАМИ**. В полиэтилен можно включать до 40 % неорганических отходов (в битуме возможна фиксация до 60 % солей). Однако **ПРИ СОДЕРЖАНИИ В ПОЛИЭТИЛЕНЕ ДО 40 % СОЛЕЙ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПРОДУКТА ПРОИСХОДИТ ПРИ 440 °С**, тогда как **БИТУМИРОВАННЫЙ ПРОДУКТ С 60 % СОДЕРЖАНИЕМ СОЛЕЙ САМОПРОИЗВОЛЬНО МОЖЕТ ЗАГОРЕТЬСЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 350°С**. Полимерные материалы можно применять для отверждения отходов с большим содержанием нитритов и нитратов, что невозможно в случае битума. Полимеры обладают хорошей химической стойкостью.

Простым **ПРОЦЕССОМ ОТВЕРЖДЕНИЯ ОТХОДОВ ЯВЛЯЕТСЯ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ИХ В ЦЕМЕНТЫ**, которое осуществляют смешиванием кубовых остатков или шламов с цементом. Смесь твердеет в емкостях, и полученные монолитные блоки удаляют на захоронение. В США, Германии и других странах проводятся исследования по усовершенствованию **МЕТОДА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ**. Предложены различные варианты изменения составов неорганической матрицы и цементов добавкой, например, различных глин, импрегнированием полимерными материалами и т.п. На рис. 7.14 показан процесс цементирования, осуществляемый в России.



1 – труба для загрузки цемента; 2 – бункер с цементом; 3 – питатель-транспортер цемента; 4 – привод смесителя; 5 – подача жидких отходов; 6 – смеситель; 7 – могильник твердых радиоактивных отходов

Рис. 7.14. Схема установки цементирования жидких радиоактивных отходов (Россия)

Выполнено **СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТВЕРЖДЕННЫХ ПРОДУКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ БИТУМИРОВАНИЕМ, ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ И ЦЕМЕНТИРОВАНИЕМ**, таких, как степень монолитности без остаточной свободной воды, возможность хранения без упаковки или наружной изоляции, выщелачиваемость радионуклидов, стойкость к механическому воздействию, радиационные повреждения в течение периода хранения, совместимость материала матрицы с обезвоженными радиоактивными отходами. Сравнение показывает, что **ВСЕ ТРИ ТИПА МАТРИЦ** (битум, полимеры, цемент) **ЯВЛЯЮТСЯ МОНОЛИТНЫМИ БЕЗ ОСТАТКОВ СВОБОДНОЙ ВОДЫ**. Цемент и полимеры – более прочные вещества, их прочность определяется соответственно значениями 300-600 и 2000 кгс/см², битум пластичен. Поэтому для битума требуется заливка в бочки, а блоки из цемента и полимеров можно хранить без дополнительной упаковки. Однако **В СВЯЗИ СО ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ВЫЩЕЛАЧИВАЕМОСТЬЮ, НАБЛЮДАЕМОЙ У ЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ОТХОДОВ, ИХ ХРАНЕНИЕ ТРЕБУЕТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ**. Бетон и полимеры обладают более высокой радиационной стойкостью. Битум при облучении $>10^6$ Дж/кг становится хрупким. Бетон огнестоек, полимеры горючи и частично разрушаются в огне, битум плавится и воспламеняется.

7.4.1. Органические отходы

К жидким органическим отходам относится **ОТРАБОТАВШИЙ ЭКСТРАГЕНТ, СОДЕРЖАЩИЙ ТБФ, РАЗБАВИТЕЛЬ И ПРОДУКТЫ ИХ РАЗЛОЖЕНИЯ**. Ежегодно на перерабатывающем заводе **НА 1 Т ТОПЛИВА ОБРАЗУЕТСЯ 0,1-0,01 М³ ОТРАБОТАВШЕГО ЭКСТРАГЕНТА И 1-2 М³ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ** от промывки разбавителем водных рафинатов и потоков целевых компонентов.

1 М³ ОТРАБОТАВШЕГО ЭКСТРАГЕНТА (30 % ТБФ) в зависимости от наличия или отсутствия очистки **МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ 0,05-0,5 г Р_u, 0,5-10,0 г U И ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ, ОБЩАЯ АКТИВНОСТЬ ТАКОГО РАСТВОРА ДОСТИГАЕТ ТЕРРАБЕККЕРЕЛЕЙ** (1 терабеккерель = 10^{12} Бк). **В ПРОМЫВНОМ ОРГАНИЧЕСКОМ РАСТВОРЕ СОДЕРЖИТСЯ ОТ 3 ДО 15 % ТБФ, чаще всего 3-5 %, а также НЕКОТОРОЕ КОЛИЧЕСТВО РАДИОНУКЛИДОВ**, активность которых составляет $(3,7-37) \cdot 10^{10}$ Бк/м³ по α -излучению и $3,7 \cdot 10^{11}-3,7 \cdot 10^{13}$ Бк/м³ по β -излучению. **ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ** предложены различные **МЕТОДЫ**:

– **РАЗЛОЖЕНИЕ ТБФ ПРИ НАГРЕВАНИИ С КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ РАСТВОРОМ (50 %-НЫМ) ЕДКОГО НАТРА,**

– **РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕСИ ТБФ-РАЗБАВИТЕЛЬ С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО РАСТВОРА ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПИРОЛИЗОМ ТБФ ИЛИ ВКЛЮЧЕНИЕМ ЕГО В ПОЛИВИНИЛХЛОРИД,**

– СЖИГАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ПРОМЫВКИ ИХ ПАРОМ И ВВЕДЕНИЕ ТБФ В КАЧЕСТВЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ К ТВЕРДЫМ БИТУМАМ В ПРОЦЕССЕ БИТУМИРОВАНИЯ САО.

На заводе в Моле (Бельгия) РАЗРАБОТАН И ИСПЫТАН МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ЭКСТРАГЕНТА, ВКЛЮЧАЮЩИЙ ДВЕ СТУПЕНИ. Сначала ЭКСТРАГЕНТ РАЗДЕЛЯЮТ ПРОМЫВКОЙ БЕЗВОДНОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТОЙ НА ДВА ПОТОКА – ТБФ И КЕРОСИН. При этом ТБФ и все активные и неактивные ПРИМЕСИ ИЗВЛЕКАЮТСЯ В ФОСФОРНУЮ КИСЛОТУ, а КЕРОСИН может быть сожжен или ПОСЛЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВНОВЬ ИСПОЛЬЗОВАН. Затем ПОЛУЧЕННЫЙ РАСТВОР ПОДВЕРГАЮТ ТЕРМИЧЕСКОМУ РАЗЛОЖЕНИЮ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКОЛО 200 °С, в результате чего ОБРАЗУЮТСЯ НЕАКТИВНЫЕ ЛЕТУЧИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ И РАДИОАКТИВНЫЙ ФОСФОРНОКИСЛЫЙ РАСТВОР. Этот РАСТВОР ПОСЛЕ ОТДЕЛЕНИЯ ЧАСТИ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ для возвращения в процесс МОЖЕТ БЫТЬ ОТВЕРЖДЕН, например, по методу PAMELA.

В Германии разрабатывают ПРОЦЕСС, В КОТОРОМ ТБФ И РАЗБАВИТЕЛЬ также СНАЧАЛА РАЗДЕЛЯЮТ С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ.

На второй ступени процесса **ФАЗУ, СОДЕРЖАЩУЮ СОЕДИНЕНИЕ ТБФ С ФОСФОРНОЙ КИСЛОТой, ОБРАБАТЫВАЮТ ВОДОЙ, В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧЕГО ПОЛУЧАЮТ РАЗБАВЛЕННУЮ ФОСФОРНУЮ КИСЛОТУ, СОДЕРЖАЩУЮ ОСНОВНУЮ АКТИВНОСТЬ, И ТБФ.**

На заводе WAK отдельными партиями было переработано более 100 м³ органических отходов. Очищенный керосин с остаточной активностью $3,7 \cdot 10^4$ Бк/м³ возвращали в процесс, а выделенный ТБФ фиксировали в поливинилхлоридных гранулах и направляли в хранилище.

Прямое сжигание жидких органических отходов затруднено из-за нерешенной проблемы улавливания и очистки образующихся газообразных отходов, а также из-за коррозии оборудования. На заводах США в Саванна-Ривере, Барнуэлле и Рокки-Флатс проходят испытания печи различных конструкций.

7.5. Газообразные отходы

ГАЗООБРАЗНЫЕ СРЕДНЕАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ ОБРАЗУЮТСЯ главным образом **ПРИ ОПЕРАЦИЯХ РЕЗКИ И РАСТВОРЕНИЯ ТОПЛИВА, РЕГЕНЕРАЦИИ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ, УПАРИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ И ЖИДКИХ ОТХОДОВ, КАЛЬЦИНАЦИИ И ПЛАВЛЕНИЯ ОТХОДОВ, А ТАКЖЕ ПРИ СДУВКЕ ИЗ ВСЕХ АППАРАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, В КОТОРЫХ ПРОВОДЯТСЯ ОПЕРАЦИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ПРОДУКТАМИ.**

Активность газообразных отходов определяется в основном содержанием в них ^{85}Kr , ^3T , ^{129}I и ^{131}I , ^{14}C , а также аэрозолей, захватывающих некоторые нелетучие продукты деления, в том числе ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru и т.п. В табл. 7.12 приведены активности газообразных и летучих радионуклидов, выделяющихся при переработке топлива водо-водяного реактора с глубиной выгорания около 34 ГВт·сут/т после различных периодов его выдержки.

ПРИ ВЫБРОСЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ возникает **ОПАСНОСТЬ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА** при вдыхании загрязненного воздуха или при употреблении воды и пищевых продуктов, содержащих радиоактивные вещества. Поэтому **ГАЗООБРАЗНЫЕ ВЫБРОСЫ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ СТРОГО РЕГЛАМЕНТИРУЮТСЯ ПО КАЖДОМУ РАДИОНУКЛИДУ** на основании принятых норм радиационной безопасности, определяющих предельно допустимый уровень загрязнения. Особенно высокие требования к действующим и проектируемым заводам предъявляют в отношении очистки газовых выбросов от $^{129,131}\text{I}$, ^3T , ^{85}K , ^{14}C .

Схемы очистки газовых выбросов радиохимических производств должны обеспечивать улавливание биологически опасных радионуклидов и надежно защищать окружающую среду от возможных вредных воздействий.

Таблица. 7.12. Состав газообразных выбросов, Бк/т, образующихся при переработке ТВЭЛов ВВЭР с глубиной выгорания 34 ГВт·сут/т

Радионуклид	$T_{1/2}$	Время после облучения			
		150 сут	1 год	10 лет	100 лет
^3T	12,34 года	$2,7 \cdot 10^{13}$ (692)	$2,5 \cdot 10^{13}$ (669)	$1,5 \cdot 10^{13}$ (403)	$9,3 \cdot 10^{10}$ (2,53)
^{14}C	$5,71 \cdot 10^3$ года	$1,66 \cdot 10^{10}$ (0,45)	$1,66 \cdot 10^{10}$ (0,45)	$1,66 \cdot 10^{10}$ (0,45)	$1,66 \cdot 10^{10}$ (0,45)
^{85}Kr	10,76 года	$4,1 \cdot 10^{14}$ (11 200)	$4 \cdot 10^{14}$ (10 800)	$2,2 \cdot 10^{14}$ (6050)	$6,8 \cdot 10^{11}$ (18,3)
^{129}I	$1,7 \cdot 10^7$ лет	$1,4 \cdot 10^9$ (3,74 $\cdot 10^{-2}$)	$1,4 \cdot 10^9$ (3,74 $\cdot 10^{-2}$)	$1,4 \cdot 10^9$ (3,74 $\cdot 10^{-2}$)	$1,4 \cdot 10^9$ (3,74 $\cdot 10^{-2}$)
^{131}I	8,05 сут	$8 \cdot 10^{10}$ (2,17)	–	–	–

7.5.1. Удаление иода

ВЫХОД осколочного ^{129}I составляет примерно $4,8 \cdot 10^7$ Бк/(МВт·год), или 10^9 БК/Т **ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА**. В топливе ВВЭР с глубиной выгорания 30-40 ГВт·сут/т **ПОСЛЕ ВЫДЕРЖКИ В ТЕЧЕНИЕ ГОДА СОДЕРЖАНИЕ ^{129}I СОСТАВЛЯЕТ 210-273 Г/Т**. При переработке топлива реакторов на быстрых нейтронах с малым временем выдержки следует учитывать еще присутствие значительного количества ^{131}I . Иод, образующийся в реакторах, практически полностью удерживается в отработавших ТВЭЛах. Даже при резке ТВЭЛов в газовую фазу поступает менее 0,25 % иода, содержащегося в топливе.

ИОД в технологических потоках и газообразных выбросах радиохимического производства **ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ** сложным химическим поведением, многообразием растворимых как в водной, так и в органической фазах форм, **ОБРАЗОВАНИЕМ, НАРЯДУ С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ, АЛКИЛИОДИДОВ**. Алкилиодиды образуются при взаимодействии неорганических форм иода с органическими веществами, присутствующими в технологическом процессе.

ЗАДАЧА ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ИОДА сводится к его **ЛОКАЛИЗАЦИИ В МЕСТЕ ОТГОНКИ ИОДА ИЗ ВОДНОЙ ФАЗЫ В ГАЗОВУЮ, В СНИЖЕНИИ ДО МИНИМУМА КОЛИЧЕСТВА ИОДА В РАСТВОРЕ** и **В ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОЧИСТКЕ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА.**

В зависимости от режима растворения топлива (периодического или непрерывного), продолжительности кипения раствора, наличия оксидов азота, продувки воздухом, присутствия органических продуктов и т.п. **ИОД МОЖЕТ НАХОДИТЬСЯ В РАСТВОРЕ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФОРМЕ, В ФОРМЕ ИОДИДОВ, ИОДАТОВ, ОРГАНИЧЕСКИХ ИОДИДОВ.**

НА СТАДИИ РАСТВОРЕНИЯ топлива в горячей азотной кислоте **СОЗДАЮТСЯ хорошие УСЛОВИЯ ДЛЯ УЛЕТУЧИВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ИОДА И HI , ОСОБЕННО ПРИ ПРОДУВКЕ РАСТВОРА ВОЗДУХОМ.** Однако наличие конденсатора для улавливания оксидов азота в сдувочной линии аппарата-растворителя приводит к возврату иода в топливный раствор вместе с конденсатом.

ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВОЗВРАТА I ЕГО ОТГОНЯЮТ ИЗ КОНДЕНСАТА ПРОДУВКОЙ ВОЗДУХОМ, ПРОМЫВАЮТ КОНДЕНСАТ ГАЗОМ-ЭКСТРАГЕНТОМ В ДЕСОРБЦИОННОЙ КОЛОННЕ ИЛИ ЧАСТИЧНО ПЕРЕГОНЯЮТ РЕГЕНЕРИРОВАННУЮ КИСЛОТУ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОДА В ВИДЕ ФРАКЦИИ ДИСТИЛЛЯТА, из которой его можно осаждать в стабильной форме иодида металла.

На стадии растворения с учетом обработки конденсата можно отогнать до 99 % иода. Оставшийся в растворе иод в дальнейшем распределяется между технологическими сдвками (примерно четвертая часть) и водными сбросными растворами после экстракции.

ИОД в отходящих газах **МОЖЕТ НАХОДИТЬСЯ В ФОРМЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ИОДА, ИОДИДОВ, ИОДАТОВ, ОРГАНИЧЕСКИХ ИОДИДОВ**, аэрозолей неорганических иодидов и т.п., что затрудняет его улавливание одним методом и **ТРЕБУЕТ** последовательного **ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ЕГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ СБРОСНЫХ ГАЗОВ**. **ИОД** из газообразных отходов **УДАЛЯЮТ С ПОМОЩЬЮ ПЕРВИЧНОГО УЛАВЛИВАНИЯ В ПРОМЫВНЫХ КОЛОННАХ И ВТОРИЧНОГО УЛАВЛИВАНИЯ В АБСОРБЕРАХ**.

На разных заводах широко применяют **ПРОМЫВКУ В СКРУББЕРАХ** различными **ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ**. **СОДОВО-ЩЕЛОЧНАЯ ПРОМЫВКА** пригодна для **УЛАВЛИВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ИОДА**, но не эффективна для поглощения алкилиодидов. **КОЭФФИЦИЕНТ ОЧИСТКИ** этим методом от молекулярного иода составляет **10-100**.

Разработан **МЕТОД "ИОДЕКС"**, заключающийся **В УЛАВЛИВАНИИ ИОДА 20-22 М HNO_3 В ПРОМЫВНОЙ КОЛОННЕ. ВСЕ ФОРМЫ ИОДА** в этом случае **ОКИСЛЯЮТСЯ ДО** нелетучего соединения **HI_3O_8** , концентрация раствора которого в 20 М HNO_3 составляет 1 г/дм³. Этим методом можно получить коэффициент очистки около 10^4 . **НЕДОСТАТКОМ ИОДЕКС-МЕТОДА** является **НЕОБХОДИМОСТЬ ПОДДЕРЖИВАТЬ** в колонне **ВЫСОКУЮ КИСЛОТНОСТЬ**. Коррозионная агрессивность концентрированной HNO_3 при этом создает **ТРУДНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**.

Для улавливания иода возможна также **ПРОМЫВКА В СКРУББЕРЕ АЗОТНОКИСЛЫМИ РАСТВОРАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ НИТРАТ РТУТИ, – "МЕРКУРЕКС"-МЕТОД**. Эта промывка позволяет удалить до 99 % иода.

В Айдахо (США), Дунрее (Великобритания), на установке АТ-1 во Франции применяют **ПРОМЫВКУ РАСТВОРОМ СОЛЕЙ ДВУХВАЛЕНТНОЙ ИЛИ СМЕСИ СОЛЕЙ ОДНОВАЛЕНТНОЙ ИЛИ ДВУХВАЛЕНТНОЙ РТУТИ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ 10^{-2} - 10^{-3} М В 0,1-1 М HNO_3** . Этот **МЕТОД**, однако, **НЕ ОБЕСПЕЧИВАЕТ УДАЛЕНИЯ АЛКИЛИОДИДОВ**.

В России предложен **МЕТОД ПОГЛОЩЕНИЯ ИОДА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ЖИДКИМИ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ. ДОСТОИНСТВАМИ** этих жидкостей являются **ХИМИЧЕСКАЯ ИНЕРТНОСТЬ, НИЗКОЕ ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ, РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ.** Этот метод позволяет получить **КОЭФФИЦИЕНТЫ ОЧИСТКИ** от элементарного и органических форм иода, равные 10^2 .

После промывки в скруббере **ДАЛЬНЕЙШУЮ ОЧИСТКУ ГАЗОВОГО ПОТОКА ОТ ИОДА ПРОВОДЯТ С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДЫХ СОРБЕНТОВ,** в качестве которых используют **АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ, ЦЕОЛИТЫ, СИЛИКАГЕЛЬ И ОКСИД АЛЮМИНИЯ, ПРОПИТАННЫЕ НИТРАТОМ СЕРЕБРА.**

НЕДОСТАТКАМИ фильтров **С АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ** являются их **ПОЖАРООПАСНОСТЬ, БЫСТРОЕ ОТРАВЛЕНИЕ ВОДЯНЫМИ И ОРГАНИЧЕСКИМИ ПАРАМИ, НЕОБХОДИМОСТЬ РАБОТАТЬ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ НИЖЕ 150 °С,** так как выше этой температуры иод десорбируется.

Изготовленные из разных насадок, пропитанных нитратом серебра, фильтры хорошо зарекомендовали себя в практике газоочистки заводов США и Западной Европы. **СЕРЕБРЯНЫЕ ЦЕОЛИТЫ** – весьма **ЭФФЕКТИВНЫЕ, НО ДОРОГИЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ИОДА.** Разработанный в Германии твердый адсорбент на их основе можно непосредственно использовать в контуре газовой очистки аппарата-растворителя.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИТА, ПРОПИТАННЫЕ НИТРАТОМ СЕРЕБРА, улавливают I_2 и алкилиодиды с коэффициентом очистки выше 10^4 . Они **НЕГОРЮЧИ, ПОГЛОЩАЮТ ИОД ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ДО 500 °С И УДЕРЖИВАЮТ ЕГО ДО 1000 °С,** но **НЕСТОЙКИ ПРИ КОНТАКТЕ С АЗОТНОЙ КИСЛОТОЙ.**

Сочетание методов промывки газоздушного потока с очисткой на твердых сорбентах позволяет получить степень очистки сбросных газов завода от иода до 10^7 .

ИОДСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ можно **ХРАНИТЬ, ВКЛЮЧИВ ИХ В ТВЕРДЫЙ ПРОДУКТ,** например **В СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТЕКЛА С НИЗКОЙ (ОКОЛО 600 °С) ТЕМПЕРАТУРОЙ ПЛАВЛЕНИЯ И ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТЬЮ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ИЛИ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ФТОРИДНОЙ СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ФТОРИДОВ ЦИРКОНИЯ, БАРИЯ, ЛАНТАНА И НАТРИЯ (КАЛИЯ).** Эти **СТЕКЛА** хорошо **УДЕРЖИВАЮТ** такие соединения, как **NaI, KI, BaI_2 .** Возможно также включение иода в эпоксидные смолы.

7.5.2. Удаление трития

В отработавших **ТВЭЛах** **СОДЕРЖИТСЯ ТРИТИЙ,** **ОБРАЗУЮЩИЙСЯ ВСЛЕДСТВИЕ ТРОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА И ПЛУТОНИЯ.** С учетом деления ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu на тепловых нейтронах и ^{238}U на быстрых нейтронах **ВЫХОД 3T_1** составляет **$1,4 \cdot 10^{11}$ Бк/год НА 1 МВт (эл.).**

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

При удельной активности элементного трития, равной $3,5 \cdot 10^{14}$ Бк/г (удельная активность трития в форме НТО составляет $5,2 \cdot 10^{-13}$ Бк/г), **В РЕАКТОРЕ МОЩНОСТЬЮ 1000 МВт В ГОД ОБРАЗУЕТСЯ ОКОЛО 2 Г $^3\text{T}_1$** . Часть его диффундирует из сердечника ТВЭЛа в оболочку, задерживается в ней или проникает в воду первого контура реактора. Оболочка из циркония значительно прочнее удерживает тритий, чем оболочка из нержавеющей стали. Если оболочка ТВЭЛа изготовлена из циркалоя, то основная масса трития (99,98 %) остается в топливе, распределяясь между сердечником и оболочкой. Соотношение количества трития в сердечнике и оболочке зависит от температуры. При температуре порядка 1000 °С в оболочку переходит до 60 % трития.

В ПРОЦЕССЕ ВСКРЫТИЯ И РАСТВОРЕНИЯ ТОПЛИВА ТРИТИЙ ВЫДЕЛЯЕТСЯ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ И ПОПАДАЕТ В РАСТВОРЫ. В результате изотопного обмена с водородом **ОН** быстро **РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ ПО ЖИДКИМ ПОТОКАМ, ПОПАДАЯ В ФОРМЕ НТО КАК В ВОДНУЮ, ТАК И В ОРГАНИЧЕСКУЮ ФАЗУ.**

ДОЛГОЕ ВРЕМЯ на заводах не обращали достаточного внимания на необходимость улавливания или концентрирования **ТРИТИЯ** и **СБРАСЫВАЛИ** его **БЕЗ КАКОГО-ЛИБО КОНТРОЛЯ В АТМОСФЕРУ С ГАЗОВЫМИ ВЫБРОСАМИ И В ВОДОСТОК СО СЛАБОАКТИВНЫМИ РАСТВОРАМИ.**

Если не принимать меры по локализации и удержанию трития, при работе завода с производительностью 1500 т/год в окружающую среду будет поступать свыше $3,7 \cdot 10^{16}$ Бк трития в год. В то же время считается, что в природе в год образуется всего $5,9 \cdot 10^{16}$ Бк трития. В настоящее время интенсивно **РАЗРАБАТЫВАЮТСЯ** различные **МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ, КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ.**

Как показали исследования, выполненные в России, США и Германии, **ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ТВЭЛов ПРИ 450-650 °С ПОЗВОЛЯЕТ ВЫСВОБОДИТЬ ДО СТАДИИ РАСТВОРЕНИЯ 90-99 % ТРИТИЯ И** затем **УДЕРЖАТЬ ЕГО В НЕБОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ** (от 10 до 90 дм³/т) **ПЕРЕРАБОТАННОГО ТОПЛИВА.** Высвобожденный **ТРИТИЙ В ВИДЕ ТРИТИЕВОЙ ВОДЫ НТО УЛАВЛИВАЕТСЯ** осушителем, например **ЦЕОЛИТОМ.** Этот **МЕТОД СПОСОБСТВУЕТ ВЫДЕЛЕНИЮ В ГАЗОВУЮ СРЕДУ ДО СТАДИИ РАСТВОРЕНИЯ** также значительного количества **⁸⁵Kr, ¹⁴C И ¹²⁹I.** В США, Японии и Бельгии **МЕТОД ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ("ВОЛОКСИДАЦИИ")** изучался применительно к топливу с большой глубиной выгорания, особенно для топлива РБН. Однако в настоящее время он не осуществлен в промышленном масштабе из-за технических трудностей (см. разд. 3.2).

Чтобы ПРЕДОТВРАТИТЬ "РАЗМАЗЫВАНИЕ" ТРИТИЯ ПО ВСЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПОТОКАМ И УМЕНЬШИТЬ ВЫБРОС ЕГО В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, в России, США, Франции, Германии и других странах ИЗУЧАЮТСЯ различные МЕТОДЫ УДЕРЖАНИЯ ТРИТИЯ. РЯД МЕТОДОВ ОСНОВАН НА УДЕРЖАНИИ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО КОЛИЧЕСТВА ТРИТИЯ В МИНИМАЛЬНОМ ОБЪЕМЕ ВОДНОГО РАСТВОРА НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ. Предлагается УСТАНОВИТЬ "БАРЬЕР ДЛЯ ТРИТИЯ" ПО ГРАНИЦЕ I ЦИКЛА ЭКСТРАКЦИИ, чтобы не допустить его проникновения в низкоактивные потоки процесса. ДЛЯ ЭТОГО пользуются следующими приемами. Во-первых, ОГРАНИЧИВАЮТ ПОДАЧУ СВЕЖЕЙ ВОДЫ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ, что ПОЗВОЛЯЕТ ИЗБЕЖАТЬ РАЗБАВЛЕНИЯ ТРИТИРОВАННОЙ ВОДЫ. Во-вторых, ИСПОЛЬЗУЮТ ДЛЯ РАСТВОРЕНИЯ ТОПЛИВА ДЫМЯЩУЮ КОНЦЕНТРИРОВАННУЮ ОКОЛО 23 М HNO_3 , А РАЗБАВЛЕНИЕ ЕЕ ПРОВОДЯТ ТРИТИРОВАННОЙ ВОДОЙ. В-третьих, ОБЕСПЕЧИВАЮТ СОБСТВЕННУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ ВОДЫ И КИСЛОТЫ В "ТРИТИЕВОЙ ЗОНЕ" СОЗДАНИЕМ ДВУХ ОТДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ КИСЛОТЫ (одной для стадии растворения и I цикла экстракции, второй для остальных стадий процесса); ЭТОТ ПРИЕМ, по данным завода в Моле (Бельгия), ПОЗВОЛЯЕТ СНИЗИТЬ ВЫБРОС ТРИТИЯ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ С КОЭФФИЦИЕНТОМ 6. Наконец, ПРОВОДЯТ ОТМЫВКУ ЭКСТРАГЕНТА ОТ ТРИТИЯ НА I ЦИКЛЕ РАСТВОРОМ

УКАЗАННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ДАЮТ ВОЗМОЖНОСТЬ
СКОНЦЕНТРИРОВАТЬ ДО 90-99 % ТРИТИЯ, содержащегося
первоначально в топливе, В ОБЪЕМЕ ВОДЫ 500 ДМ³/Т и ПОЛУЧАТЬ
750 М³/ГОД ТРИТИЕВЫХ ОТХОДОВ ОТ ЗАВОДА
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 1500 Т/ГОД .

ЧАСТЬ ТРИТИЯ, окклюдированного В ЦИРКАЛОВЫХ
ОБОЛОЧКАХ, ПОДЛЕЖИТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМУ ВЫДЕЛЕНИЮ,
например, МЕТОДОМ ДЕГАЗАЦИИ ИЛИ ПЛАВЛЕНИЯ.

ДАЛЬНЕЙШАЯ ПЕРЕРАБОТКА ТРИТИЕВЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ
может заключаться в ИХ ОТВЕРЖДЕНИИ ИЛИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ.
Разработаны МЕТОДЫ ПЕРЕВОДА ТРИТИЙСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ
В ФОРМЫ, ПРИГОДНЫЕ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ИЛИ
ЗАХОРОНЕНИЯ. Тритированную воду адсорбируют силикагелем,
цеолитами, активированным оксидом алюминия, сульфатом
кальция, включают в органические полимеры. Часто для фиксации
трития применяют цементы. Чтобы уменьшить выщелачиваемость
цементов, их покрывают битумами, смазками, парафинами, эмалями,
органическими полимерами.

ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТРИТИЯ С некоторыми МЕТАЛЛАМИ
(ТИТАНОМ, ЦИРКОНИЕМ, ГАФНИЕМ, ТОРИЕМ) ОБРАЗУЮТСЯ
ТРИТИРОВАННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГИДРИДЫ. Из газовой фазы
третий можно улавливать при каталитическом гидрировании
стирола. Катализатором служит никель на кизельгуре или родий на
оксиде алюминия.

ОСНОВОЙ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМА ТРИТИЕВЫХ ВОД служат **МЕТОДЫ ИЗОТОПНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ВОДЫ ТРИТИЕМ** с комбинацией ступенчатого электролиза, каталитического изотопного обмена и криогенной дистилляции. Исследуют методы изотопного обогащения с искровым возбуждением, диффузии через металлические мембраны, термодиффузии, газовой хроматографии.

В США в Аргоннской национальной лаборатории, а также в Германии проводятся **РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ЗАКАЧКИ НАСЫЩЕННЫХ ТРИТИЕМ ВОД В ГЛУБОКИЕ ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ**. В разработках учитывается практика использования отработавших нефтяных скважин для закачки промышленных отходов.

7.5.3. Удаление радиоактивных благородных газов (РБГ)

В ОТРАБОТАВШЕМ ТОПЛИВЕ, поступающем на переработку, **СОДЕРЖАТСЯ** радиоактивный ^{85}Kr и стабильный Xe . **ВЫХОД ^{85}Kr В ПРОЦЕССЕ ДЕЛЕНИЯ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ ^{235}U** составляет $1,9 \cdot 10^{13}$ Бк/(МВт (эл.)·год) и **В ПРОЦЕССЕ ДЕЛЕНИЯ ^{239}Pu – $9,4 \cdot 10^{12}$ Бк/(МВт·год)**. **КАЖДАЯ ТОННА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ И ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ СОДЕРЖИТ** соответственно $1,85 \cdot 10^{14}$ и $7,4 \cdot 10^{14}$ Бк ^{85}Kr . Часть ^{85}Kr выделяется на АЭС, однако **БОЛЬШАЯ ЧАСТЬ ОСТАЕТСЯ В ТВЭЛах**.

РБГ ВЫДЕЛЯЮТСЯ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ В ПРОЦЕССАХ РЕЗКИ И главным образом **РАСТВОРЕНИЯ ТВЭЛов** и **ВМЕСТЕ С ГАЗОВЫМИ ВЫБРОСАМИ ПОПАДАЮТ В АТМОСФЕРУ**, так как до последнего времени в системах газоочистки не было предусмотрено улавливание РБГ. **ВЫБРОС ^{85}Kr для ЗАВОДА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 1500 Т/ГОД** может составить **$(3,7-6,3) \cdot 10^{17}$ БК/ГОД**. При неблагоприятных метеорологических условиях **ЭТА АКТИВНОСТЬ МОЖЕТ СТАТЬ ПРИЧИНОЙ ПРЕВЫШЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ^{85}Kr И ВЫЗВАТЬ ОБЛУЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО ВБЛИЗИ ЗАВОДА**. Соображения локального характера, а также накопление ^{85}Kr в атмосфере в глобальном масштабе вызывают необходимость введения системы улавливания РБГ на радиохимических заводах.

ДЛЯ УДАЛЕНИЯ КРИПТОНА из сбросных газов предложены **МЕТОДЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АДСОРБЦИИ** на активированных углях или молекулярных ситах и **АДСОРБЦИИ** при комнатной температуре, **АБСОРБЦИИ ВО ФРЕОНАХ**, например дихлордифторметане или в жидком CO_2 . В стадии лабораторных исследований находятся **ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ КЛАТРАТОВ, УДЕРЖИВАЮЩИХ РБГ; ДИФФУЗИИ ЧЕРЕЗ СЕЛЕКТИВНЫЕ МЕМБРАНЫ**, например метилфенилсиликоновые; **ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ**.

Эти методы находятся в разной степени готовности для внедрения в промышленность. Лучше других разработаны **МЕТОДЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ** вследствие использования опыта по ректификации воздуха и адсорбции на активированных углях, с успехом применяемой в системе очистки газов АЭС. **КОЭФФИЦИЕНТЫ ОЧИСТКИ ОТ РБГ** этими методами достигают соответственно **10^4 И 10^3** .

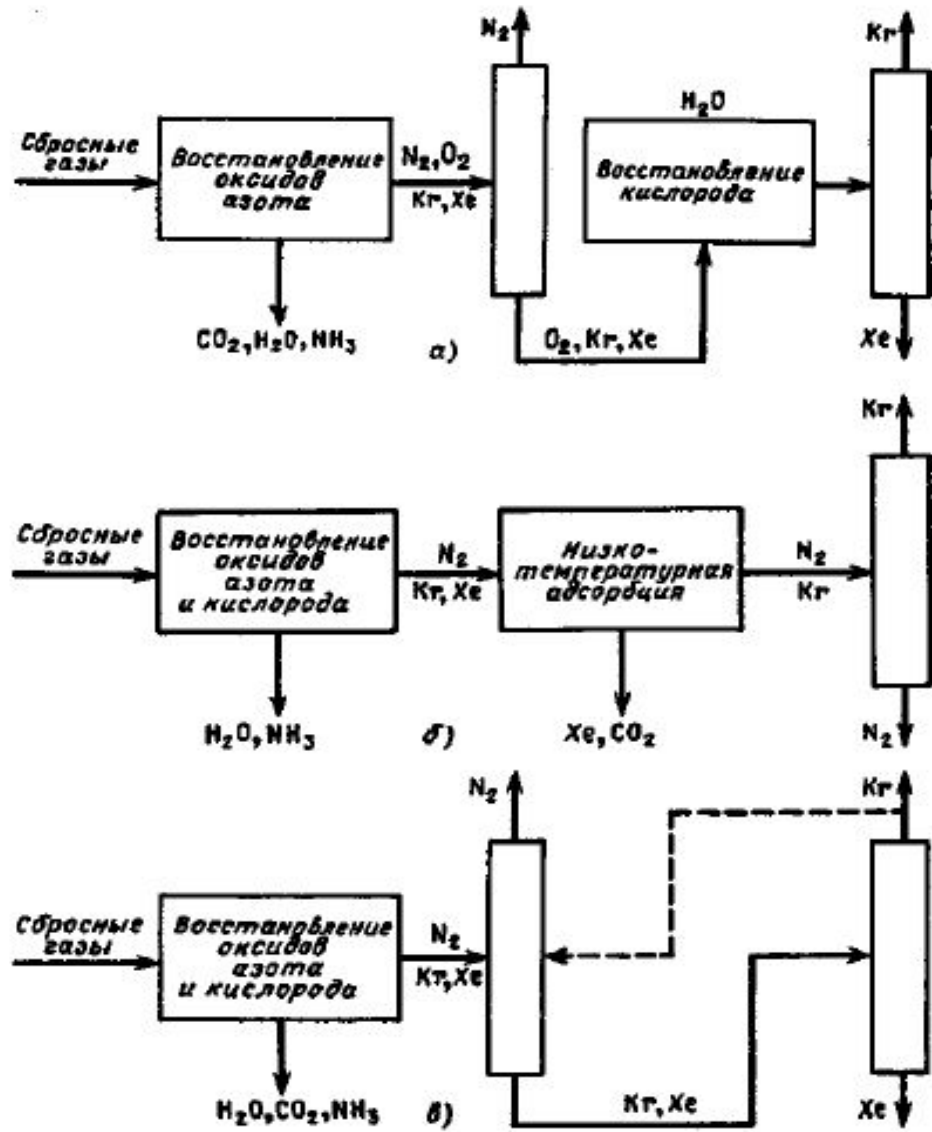
На основании результатов полупромышленных исследований на неактивных смесях газов в Ок-Ридже (США) установлено, что **МЕТОД АБСОРБЦИИ КРИПТОНА В ЖИДКОМ CO_2 МОЖЕТ ОБЕСПЕЧИТЬ** высокий **КОЭФФИЦИЕНТ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ – 1000** и выше.

Проведены испытания на демонстрационной **УСТАНОВКЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ГАЗОВ KALC** – Krypton absorption in liquid carbon dioxide. Установка включает три колонны: сорбционную с насадкой, работающую при температуре от -30 до -10 °С и давлении 0,1-2,4 МПа, ректификационную, где удаляется большая часть N_2 , O_2 и Ar при 10 °С и давлении 0,35 МПа, и колонну, работающую при давлении около 0,1 МПа, где происходит разделение Kr и CO_2 .

МЕТОД УЛАВЛИВАНИЯ РБГ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНЫХ МЕМБРАН проходит еще стадию лабораторных исследований.

ВНЕДРЕНИЕ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК требует **УЧЕТА ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА ИЗ КИСЛОРОДА, ЕГО АККУМУЛЯЦИИ НА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ УСТАНОВКИ** и **ЕЕ ЗАКУПОРКИ**. Повышение на несколько порядков по сравнению с воздухом содержания стабильного ^{134}Xe заставляет принимать во внимание и его свойства, а именно, низкую растворимость в жидком азоте и относительно высокую температуру плавления $-111,8\text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому возникает опасность затвердевания ксенона, закупорки им трубопроводов и нарушения работы всей установки.

В предложенных специалистами разных стран вариантах схемы очистки сбросных газов **ОБРАЗОВАНИЕ ОЗОНА И ВЫМОРАЖИВАНИЕ КСЕНОНА ПРЕДОТВРАЩАЮТ, ОГРАНИЧИВАЯ ВРЕМЯ КОНТАКТА КИСЛОРОДА СО СМЕСЬЮ КРИПТОН-КСЕНОН, ПРИМЕНЯЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КИСЛОРОДА ДО H_2O , НИЗКОТЕМПЕРАТУРНУЮ** или при обычной температуре **АДСОРБЦИЮ КСЕНОНА ПЕРЕД СТАДИЕЙ КРИОГЕННОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ**, а также **ДИСТИЛЛЯЦИЮ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДО 0,5 МПА** и **ЦИРКУЛЯЦИЮ КРИПТОНА** в системе для увеличения его относительного содержания. На рис. 7.14 показаны разные варианты включения колонн низкотемпературной дистиляции в систему газоочистки,



а – Франция, Япония, Бельгия; б – США, Япония, Германия; в – Германия

Рис. 7.14. Схемы извлечения Кр, разработанные в разных странах

Сочетание МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОТДЕЛЕНИЯ КСЕНОНА ОТ КРИПТОНА С ПОМОЩЬЮ АДСОРБЦИИ С МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ целесообразно потому, что ПОЗВОЛЯЕТ ИЗМЕНИТЬ СООТНОШЕНИЕ Kr/Xe В ПОЛЬЗУ КРИПТОНА, СОКРАТИТЬ ОБЪЕМЫ ХРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО КРИПТОНА ПРИМЕРНО В 10 РАЗ, либо ВЫДЕЛИТЬ НЕРАДИОАКТИВНЫЙ КСЕНОН В АТМОСФЕРУ, либо после дополнительной очистки ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ. ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ КСЕНОНА из ксенон-криптоновых концентратов предложен ХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД, ОСНОВАННЫЙ НА ОБРАЗОВАНИИ ФТОРИДОВ КСЕНОНА.

ИСПЫТАНИЯ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ на установке **KRETA** (Krypton-Entfernungs-Tiefemperaturanlage), созданной в Карлсруэ для выделения ^{85}Kr , показали, что В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЕ НАКАПЛИВАЕТСЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО (до нескольких процентов) ОЗОНА и что ПРИМЕСИ КИСЛОРОДА И ОКСИДОВ АЗОТА УХУДШАЮТ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ КОЛОННЫ (оксиды азота могут кристаллизоваться как в донной части колонны, так и в зоне подачи газа, закупоривая тарелки). ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ОТ H_2O , CO_2 И NO_2 и т.п. ПЕРЕД ДИСТИЛЛЯЦИЕЙ ИСПОЛЬЗУЮТ СИСТЕМУ ГАЗООЧИСТКИ **ADAMO** (Adsorption on Molekularsieben) С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ СИТАМИ. Были получены КОНЦЕНТРАТЫ КРИПТОНА С ЧИСТОТОЙ >97 % И КСЕНОНА С ЧИСТОТОЙ ~ 99 %.

В Германии расширяются исследования **МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОЙ АДСОРБЦИИ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ФРЕОНОМ-12 ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**. Предполагается, что этот метод, имеющий технические преимущества перед криогенным, будет внедрен на заводе WAK.

ВОПРОС ОБ УСЛОВИЯХ И ФОРМЕ ХРАНЕНИЯ ВЫДЕЛЕННОГО С ПОМОЩЬЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ КРИПТОНА НАХОДИТСЯ ЕЩЕ В СТАДИИ ИССЛЕДОВАНИЯ. С точки зрения надежности хранения, простоты, доступности и экономичности изучают такие варианты, как **ХРАНЕНИЕ В БАЛЛОНАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ** (Германия), **ХРАНЕНИЕ В БАЛЛОНАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ПРИСУТСТВИИ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ** (Бельгия, Япония), **ВКЛЮЧЕНИЕ КРИПТОНА В РАЗЛИЧНЫЕ МАТРИЦЫ – В ЦЕОЛИТЫ** (США, Германия) или **В МЕТАЛЛ** (Великобритания).

Большое внимание уделяют **РАЗМЕРАМ КОНТЕЙНЕРА, КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛА КОНТЕЙНЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РУБИДИЯ – ПРОДУКТ РАСПАДА ^{85}Kr , ВЫБОРУ И ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА МАТРИЦЫ, ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ХРАНЕНИЯ** и т.п. Изучают также **ВОЗМОЖНОСТЬ ХРАНЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С КРИПТОНОМ В МОРЕ** (Нидерланды, Германия).

На основании результатов исследований ожидается, что в ближайшие годы будут **ОПРЕДЕЛЕНЫ ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ХРАНЕНИЯ И ВЫДАНЫ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ УЗЛА КОНЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ КРИПТОНА НА РАДИОХИМИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ.**

7.5.4. Удаление ^{14}C

Нуклид ^{14}C **ОБРАЗУЕТСЯ** в ядерных реакторах **В ОСНОВНОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕАКЦИИ $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$** . По имеющимся оценкам в ВВЭР с водой под давлением образуется $6,3 \cdot 10^8$ Бк/(МВт(эл.)·год), а в РБМК с кипящей водой $3,4 \cdot 10^9$ Бк/(МВт(эл.)·год) ^{14}C . Большая часть ^{14}C сохраняется в топливе реакторов на тепловых нейтронах и РБН.

ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТРАБОТАВШИХ ТВЭЛОВ ^{14}C ВЫДЕЛЯЕТСЯ преимущественно **В ВИДЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА (ДО 95 %), ОСТАЛЬНОЕ – ОКСИД УГЛЕРОДА И УГЛЕВОДОРОДЫ.** промышленные методы улавливания ^{14}C до настоящего времени **НЕ РАЗРАБОТАНЫ.** Предложено **ИСПОЛЬЗОВАТЬ ПОГЛОТИТЕЛИ** разной природы: **РАСТВОРЫ ГИДРОКСИДОВ, ФТОРУГЛЕРОДЫ, АЛЮМОСИЛИКАТЫ** и др. **ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ФТОРУГЛЕРОДОВ ДЛЯ УЛАВЛЕНИЯ ^{14}C** в интервале температур от -40 до $+4$ °С **ПОКАЗАНО, ЧТО МОЖЕТ БЫТЬ УЛОВЛЕНО 99,9 % ^{14}C .**

7.5.5. Аэрозоли

При переработке отработавшего топлива **ОБРАЗУЕТСЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**, которые **ПОСТУПАЮТ В ГАЗОВОЗДУШНЫЕ ВЫБРОСЫ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ**. В связи с этим **В СИСТЕМЕ ГАЗООЧИСТКИ ЗАВОДА ДОЛЖНА БЫТЬ ПРЕДУСМОТРЕНА ВОЗМОЖНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ И СУХОЙ ПЫЛИ**. Основная масса **АЭРОЗОЛЕЙ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ СОЛЕВЫЕ ТУМАНЫ**, а также **ТУМАНЫ КИСЛОТ С СОДЕРЖАНИЕМ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ОТ ДЕСЯТКОВ МИЛЛИГРАММОВ ДО НЕСКОЛЬКИХ ГРАММОВ НА КУБОМЕТР ГАЗА**, причем **АКТИВНОСТЬ ТУМАНОВ ОБУСЛОВЛЕНА ЧАСТИЦАМИ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 1 МКМ**. **КОЛИЧЕСТВО СУХОЙ ПЫЛИ И АЭРОЗОЛЕЙ** существенно **ЗАВИСИТ ОТ СПОСОБА РЕЗКИ ТВЭЛов И УСЛОВИЙ РАСТВОРЕНИЯ ТОПЛИВА**.

ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ АЭРОЗОЛЕЙ, образующихся на операции растворения топлива и содержащих особенно токсичные α -активные радионуклиды, **УДАЛЯЕТСЯ ИЗ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ПЕРВОЙ СТАДИИ ЕГО ОЧИСТКИ**, когда газовые отходы подвергают кислотной промывке для улавливания оксидов азота.

Затем **ГАЗОВЫЕ ВЫБРОСЫ ОЧИЩАЮТ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ.** Надежными в работе и обеспечивающими необходимую степень очистки зарекомендовали себя **ВОЛОКНИСТЫЕ САМООЧИЩАЮЩИЕСЯ ФИЛЬТРЫ.** В низкоскоростных высокоэффективных самоочищающихся фильтрах **ЖИДКИЕ ЧАСТИЦЫ ОСАЖДАЮТСЯ НА ВОЛОКНАХ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СИЛ ПЕРЕМЕЩАЮТСЯ В ФИЛЬТРУЮЩЕМ СЛОЕ И ЗАТЕМ УДАЛЯЮТСЯ ИЗ ФИЛЬТРА.** Характеристики фильтра при этом остаются неизменными.

В России созданы различные **МОДИФИКАЦИИ** (кассетно-клиновыые, цилиндрические) **ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОВОЛОКНА** с поверхностью фильтрующего слоя от 1,5 до 5,6 м².

ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ СУХОЙ ПЫЛИ используют **ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОТКАНЕЙ И МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ.** Металлотканевые фильтры обладают высокой эффективностью очистки, сохраняющейся при низкой и высокой температурах, высокой механической прочностью и коррозионной стойкостью. В отличие от металлокерамических фильтров они имеют меньшее аэродинамическое сопротивление.

В КАЧЕСТВЕ ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЮТ СЕТКИ ИЗ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ диаметром 0,09-0,055 и 0,064-0,032 мм. Введение в стали Cr, Ni и Mo повышает устойчивость фильтрующего материала из нержавеющей стали по отношению к иоду в сочетании с паром и оксидами азота. Применение **МЕТАЛЛОТКАНЕВЫХ ФИЛЬТРОВ** для очистки газовых выбросов от сухой радиоактивной пыли позволило **ДОСТИЧЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ 95-99 % ДЛЯ ЧАСТИЦ ДИАМЕТРОМ МЕНЕЕ 1 МКМ И 99,5-99,9 % ДЛЯ ЧАСТИЦ ДИАМЕТРОМ 2,5-3 МКМ.** При высокой концентрации пыли в газоздушном потоке **НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ ОЧИСТКИ ИСПОЛЬЗУЮТ МЕТАЛЛОТКАНЕВЫЕ ФИЛЬТРЫ И СКРУББЕРЫ.**

В условиях высокой температуры и влажности предложено **ИСПОЛЬЗОВАТЬ В КАЧЕСТВЕ ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА СМЕШАННОЕ ВОЛОКНО ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНА И ПОЛИКАРБОНАТА,** обладающего более высокой механической прочностью, чем стекловолокно, и более высокой химической стойкостью в агрессивных средах.

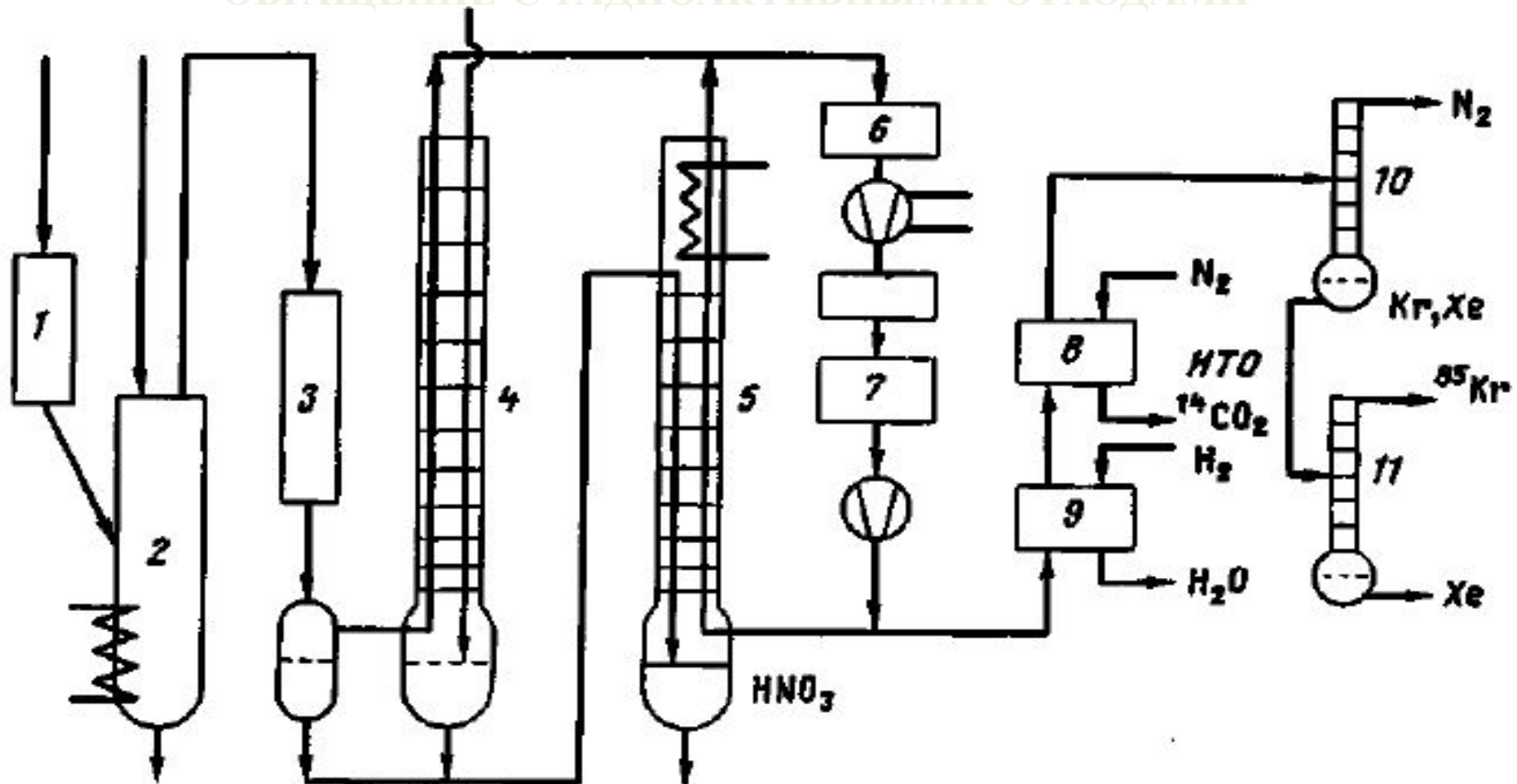
7.5.6. Система газоочистки на радиохимических заводах

Как правило, на радиохимических заводах по переработке облученного топлива и установках для отверждения ВАО воздают **ДВА ТИПА РАЗДЕЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ: ОБЩЕОБМЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**, обслуживающей основное производственное здание, помещение для приготовления нерадиоактивных реагентов, отделение приема и хранения топлива, и **СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УЗЛОВ И АППАРАТОВ**, включая баки-хранилища жидких ВАО.

ФИЛЬТРОВАЛЬНАЯ УСТАНОВКА СИСТЕМЫ ОБЩЕОБМЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ состоит **ИЗ ДВУХ НЕЗАВИСИМЫХ СИСТЕМ ФИЛЬТРОВ И ВЫТЯЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ. ЗАГРЯЗНЕННЫЙ ВОЗДУХ ПРОХОДИТ**, как правило, через **ЧЕТЫРЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ФИЛЬТРА: ФИЛЬТР ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ, ФИЛЬТР ГРУБОЙ ОЧИСТКИ И ДВА ФИЛЬТРА ТОНКОЙ ОЧИСТКИ**, что обеспечивает **ЭФФЕКТИВНОЕ УЛАВЛИВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИАМЕТРОМ ДО 0,3 МКМ.**

ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ТИПА обеспечивают удержание всех радионуклидов, **АЭРОЗОЛЕЙ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ**. Эта **СИСТЕМА** очистки газов **ВКЛЮЧАЕТ СКРУББЕР ЯДЕРНО-БЕЗОПАСНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ, ЛОВУШКУ ДЛЯ АЭРОЗОЛЕЙ** (каплеотбойник), **КОНДЕНСАТОР, КОЛОННУ ДЛЯ ОКИСЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА**, в которую вводят кислород, **КОЛОННУ ДЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА NO_x** , **СКРУББЕРЫ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ИОДА** с помощью различных растворов, **ТВЕРДЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ ИОДА** (серебряный цеолит), **АППАРАТ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ОСТАТКОВ ОКСИДОВ АЗОТА** каталитическим восстановлением до NH_3 , **АППАРАТ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КИСЛОРОДА** водородом, **СУШИЛКУ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ВОДЫ** с помощью молекулярных сит, **СИСТЕМУ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ КРИПТОНА, ДВА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРА**.

Принципиальная схема газоочистки приведена из рис. 7.15. Сильно насыщенные парами **ГАЗООБРАЗНЫЕ ОТХОДЫ ИЗ АППАРАТА-РАСТВОРИТЕЛЯ ПРОХОДЯТ ЧЕРЕЗ КОНДЕНСАТОР**, причем **В АППАРАТ-РАСТВОРИТЕЛЬ С ПОТОКОМ ГАЗА-НОСИТЕЛЯ** (воздух или азот) **ПОСТУПАЮТ** также **ГАЗООБРАЗНЫЕ ОТХОДЫ ОТ ОПЕРАЦИИ РЕЗКИ ТОПЛИВА**. **КОНДЕНСАТ** растворяет частично иод и поэтому **ПЕРЕД РЕЦИКЛОМ ДОЛЖЕН БЫТЬ ПРОПУЩЕН ЧЕРЕЗ ИОД-ДЕСОРБЦИОННУЮ КОЛОННУ**.



1 – узел резки топлива; 2 – аппарат-растворитель; 3 – конденсатор; 4 – ре-комбинационная колонна; 5 – десорбционная колонна; 6 – система фильтров грубой, тонкой и абсолютной очистки; 7 – серебряный фильтр; 8 – реактор для удаления кислорода и остатков оксидов азота; 9 – фильтр, заполненный молекулярным ситом; 10, 11 – ректификационные колонны для выделения и разделения криптона и ксенона

Рис. 7.15. Принципиальная схема газоочистки

ГАЗООБРАЗНЫЕ ОТХОДЫ в колонне рекомбинации оксидов азота **ПРОМЫВАЮТ ВОДОЙ**, **ОБРАЗУЮЩАЯСЯ КИСЛОТА ПЕРЕД ВОЗВРАТОМ В АППАРАТ-РАСТВОРИТЕЛЬ ПОСТУПАЕТ В КОЛОННУ**, а **ГАЗОВАЯ ФАЗА ФИЛЬТРУЕТСЯ ЧЕРЕЗ ФИЛЬТРЫ ГРУБОЙ, ТОНКОЙ И КОНТРОЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ**. Колонна 4 должна иметь значительный объем, чтобы обеспечить возможность завершения реакций рекомбинации оксидов азота, которые при низкой концентрации оксидов протекают медленно.

В колонне 5 **ДЕСОРБЦИЯ ИОДА ПРОТЕКАЕТ ПРИ ПРОПУСКЕНИИ ЧЕРЕЗ КИСЛОТУ ГАЗОВЫХ ОТХОДОВ, ОЧИЩЕННЫХ ОТ ИОДА** на фильтре 7. Операции рекомбинации и десорбции проводят в колоннах с насадками. После очистки от аэрозолей **ГАЗОВЫЕ ОТХОДЫ ОЧИЩАЮТ ОТ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ИОДА И АЛКИЛИОДИДОВ НА СИЛИКАГЕЛЕВЫХ ПОРИСТЫХ ФИЛЬТРАХ, ПРОПИТАННЫХ НИТРАТОМ СЕРЕБРА**. Освобожденный от иода **ГАЗ ПРОХОДИТ СТАДИЮ ДООЧИСТКИ ОТ ОСТАТКОВ ОКСИДОВ АЗОТА, КИСЛОРОДА, ВОДОРОДА И ^{14}C** , а затем с помощью низкотемпературной дистилляции **ИЗ НЕГО ВЫДЕЛЯЮТ ^{85}Kr И Xe** .

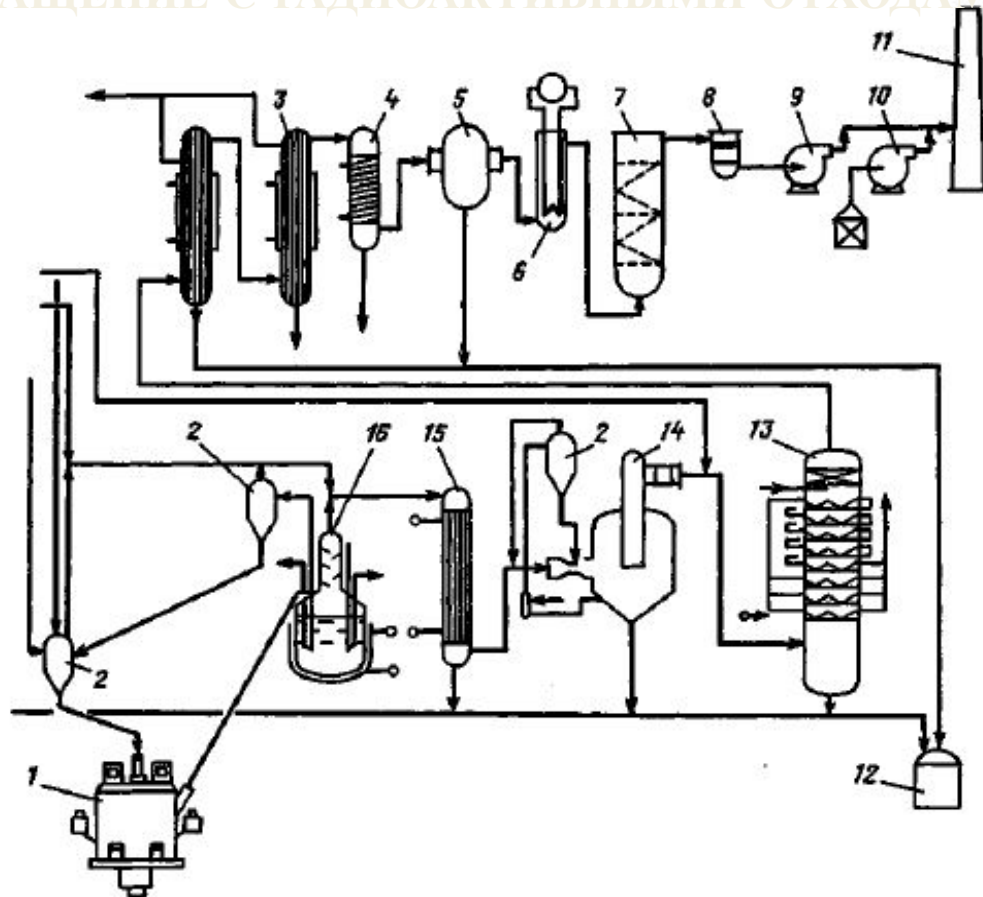
Схема очистки газообразных отходов завода по остекловыванию (Япония) включает скруббер для улавливания пыли, конденсатор для охлаждения газовых отходов и осаждения летучих радионуклидов, скруббер Вентури для отделения частиц, скруббер для вымывания из газового потока водорастворимых примесей, каплеотбойник, поглотитель рутения, фильтры для удаления аэрозолей (рис. 7.16).

7.6. Твердые отходы

На перерабатывающем заводе образуются **ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ, В РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ.** К **ВЫСОКОАКТИВНЫМ ТВЕРДЫМ ОТХОДАМ ОТНОСЯТ ОБОЛОЧКИ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТВС, А ТАКЖЕ НЕРАСТВОРИМЫЕ ВЕЩЕСТВА, ОТДЕЛЕННЫЕ ОТ РАСТВОРОВ ТОПЛИВА** декантацией, центрифугированием или фильтрацией.

На заводе производительностью 1400 т/год, перерабатывающем топливо водо-водяных реакторов (**С ГЛУБИНОЙ ВЫГОРАНИЯ 33 ГВт·сут/т и выдержкой в течение 1 года**), по расчету **ЕЖЕГОДНО ОБРАЗУЕТСЯ ОКОЛО 560 м³/год (420 кг/т) ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ В ВИДЕ ОБОЛОЧЕК ИЗ ЦИРКАЛОЯ И ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СБОРОК** (табл. 7.13).

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ



1 – плавильная печь; 2 – фильтр; 3 – водяной скруббер; 4 – холодильник; 5 – каплеотбойник; 6 – нагреватель; 7 – поглотитель рутения; 8 – высокоэффективный фильтр; 9 – воздуходувка; 10 – воздуходувка для разбавления газовых отходов; 11 – труба; 12 – бак для жидких отходов; 13 – водяной скруббер с перфорированными тарелками; 14 – скруббер Вентури; 15 – конденсатор; 16 – скруббер для улавливания пыли

Рис. 7.16. Система газоочистки установки по остекловыванию высокоактивных отходов

Таблица 7.13. Накопление твердых отходов в виде оболочек, т, в странах, ведущих переработку топлива

Страна	1985 г.	1990 г.	2000 г.	2010 г.
Бельгия	75		300	550
Великобритания	188	1300	2000	3700
Индия			1500	2800
Италия	3	250	800	1500
Франция	1740	4900	7500	13 800
Германия	135	480	1500	2800
Всего:	2276	7410	13 600	25 150

РАДИОАКТИВНОСТЬ ОТХОДОВ ИЗ ОБОЛОЧЕК СКЛАДЫВАЕТСЯ ИЗ НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ, обусловленной продуктами нейтронной активации, а также **ИЗ АКТИВНОСТИ ОСТАТКОВ НЕРАСТВОРЕННОГО ТОПЛИВА** (около 0,2 % загрузки на растворение), **АКТИВНОСТИ НУКЛИДОВ, ПРОНИКШИХ ВНУТРЬ МАТЕРИАЛА**, и **АКТИВНОСТИ ОСАДКОВ И ОТЛОЖЕНИЙ ИЗ РАСТВОРА**. Например, у нержавеющей стали наведенная активность определяется нуклидами ^{54}Mn , ^{55}Fe и ^{60}Co . Активность оболочки из нержавеющей стали РБН после года выдержки составляет примерно $1,6 \cdot 10^{16}$ Бк/т при тепловыделении 2300 Вт/т, а радиоактивность циркаловых оболочек, обусловленная содержанием ^{95}Zr , ^{95}Nb и ^{60}Co , составляет $4,1 \cdot 10^{14}$ Бк/т при тепловыделении 77 Вт/т также после 1 года выдержки.

На радиохимических заводах **ОБОЛОЧКИ ИЗ ЦИРКАЛОЯ ХРАНЯТ** в неуплотненном виде **В БЕТОННЫХ**, облицованных нержавеющей сталью, водозаполненных **БУНКЕРАХ, БАКАХ, БОЧКАХ, ХРАНИЛИЩАХ**, а **ОБОЛОЧКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ** в сухом виде **В БЕТОННЫХ БАКАХ**, облицованных нержавеющей сталью. Исключение составляют Индия и Германия, где куски оболочек цементируют в бочках вместимостью 170-200 дм³.

Существующая практика не может быть признана удовлетворительной, особенно с увеличением масштабов переработки и образованием больших объемов этих отходов. Поэтому в разных странах **АКТИВНО ИЗУЧАЮТ ПРОБЛЕМУ ПЕРЕРАБОТКИ ОБОЛОЧЕК**, цель которой заключается **В СОКРАЩЕНИИ ОБЪЕМОВ ЭТИХ ОТХОДОВ, НАДЕЖНОЙ ФИКСАЦИИ В НИХ РАДИОАКТИВНЫХ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОГО И ЭКОНОМНОГО СПОСОБА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ИЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ.**

В связи с этим изучаются **РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ.**

Одним из таких методов является **УПЛОТНЕНИЕ КУСКОВ ОБОЛОЧЕК ПРЕССОВАНИЕМ В БРИКЕТЫ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЗАЛИВКОЙ ОСТАВШИХСЯ ПУСТОТ СПЛАВАМИ НА ОСНОВЕ СВИНЦА, ОЛОВА И СУРЬМЫ С ПРИСАДКАМИ ДРУГИХ МЕТАЛЛОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕМ ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРОДУКТА В КОНТЕЙНЕРЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ** (Бельгия, Германия). Другой метод представляет собой **ВКЛЮЧЕНИЕ КУСКОВ ОБОЛОЧЕК В БЕТОН ПОСЛЕ ИХ УПЛОТНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПРОКАТНОЙ МАШИНЫ** (Германия).

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Возможно также **ВКЛЮЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ В МАТРИЦУ ИЗ 80 % ГРАФИТА И 20 % СЕРЫ** с прессованием и нагреванием до 150 °С (Германия), **ВКЛЮЧЕНИЕ В РАСПЛАВ СТЕКЛА** (Франция, США), а также **СМЕШЕНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ОБОЛОЧЕК С ПОРОШКОМ АЛЮМИНИЯ, ПРЕССОВАНИЕ И СПЕКАНИЕ ПРИ 450 °С** (Германия) **ИЛИ С ПОРОШКОМ Al_2O_3 С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРЕССОВАНИЕМ И СПЕКАНИЕМ ПРИ 1200 °С** (Франция).

С целью сокращения объемов циркалоевых оболочек, а также, возможно, с целью получения чистых слитков из циркония в США, Франции и Японии изучают **МЕТОДЫ ИНДУКЦИОННОЙ ОЧИЩАЮЩЕЙ ПЛАВКИ В АТМОСФЕРЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА И В ПРИСУТСТВИИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ ДОБАВОК**, а также **ПЛАВКИ С ДОБАВКАМИ МЕДИ, ЖЕЛЕЗА** и других металлов **ДЛЯ Понижения температуры плавления и с добавками стекла или фторидов кальция и магния для очистки циркония**. Получены слитки циркония диаметром 130 мм и длиной 1070 мм. Процесс плавки оболочек, возможно, будет внедрен на французских заводах.

В США разработан **МЕТОД, ЗАКЛЮЧАЮЩИЙСЯ В ОКИСЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ДО ОКСИДОВ И ПРЕВРАЩЕНИИ ИХ В СИЛИКАТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**. Полное окисление циркалоя и нержавеющей стали достигается за 1-4 ч при 500-600 °С под действием смеси из 40-50 % HF и 35-60 % кислорода.

При сплавлении образовавшихся оксидов с базальтом, Na_2CO_3 и V_2O_3 при $1200\text{ }^\circ\text{C}$ образуются плотные силикатные соединения, стойкие к выщелачиванию.

В лаборатории фирмы "Сандия" (США) изучается **ПРОЦЕСС ПРЕВРАЩЕНИЯ ЦИРКАЛОВЫХ ОБОЛОЧЕК В НЕОРГАНИЧЕСКИЙ ИОНООБМЕННЫЙ МАТЕРИАЛ, КОТОРЫЙ** в дальнейшем **МОЖЕТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАН ДЛЯ ФИКСАЦИИ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И АКТИНОИДОВ, С ПОСЛЕДУЮЩИМ СПЕКЕНИЕМ ЕГО В КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, ПРИГОДНЫЙ ДЛЯ НАДЕЖНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ВАО.** Процесс включает подготовку оболочек к процессу хлорирования (сушка, вакуумная дегазация, нагревание до $450\text{ }^\circ\text{C}$); хлорирование оболочек, например, с помощью NH_4Cl , с последующей возгонкой летучих хлоридов; взаимодействие сконденсированных и охлажденных хлоридов (в основном, циркония) с бензольным раствором изопропилового спирта в присутствии аммиака с образованием промежуточного соединения – алкоксида; очистку алкоксида циркония трехкратной перекристаллизацией; взаимодействие алкоксида с метанольным раствором едкого натра и гидролиз образовавшегося промежуточного соединения, сопровождающийся выпадением в осадок цирконата натрия.

Специалисты лаборатории фирмы "Сандия" подсчитали, что, ЕСЛИ ЦИРКОНИЙ ИЗ ОБОЛОЧЕК ОТ 1 Т ТВЭЛ_{ов} ДАЖЕ С ВЫХОДОМ 70 % ПРЕВРАТИТЬ В НЕОРГАНИЧЕСКИЙ ОБМЕННИК, ЕГО БУДЕТ ДОСТАТОЧНО ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ ВСЕХ ЖИДКИХ ВАО, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ЭТОГО КОЛИЧЕСТВА ТОПЛИВА. При этом НА КАЖДУЮ ТОННУ ТОПЛИВА БУДЕТ ОБРАЗОВЫВАТЬСЯ 0,071 М³ ВЫСОКОАКТИВНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ЧТО МЕНЬШЕ ОБЪЕМА БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА (0,085 М³), КОТОРОЕ ДОЛЖНО ОБРАЗОВАТЬСЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ТОГО ЖЕ КОЛИЧЕСТВА ТОПЛИВА.

В Германии и Великобритании также разработаны испытанные в лабораторном масштабе МЕТОДЫ ПРЕВРАЩЕНИЯ ОБОЛОЧЕК В ОКСИД ИЛИ ГИДРОКСИД ЦИРКОНИЯ.

Источниками средне- и низкоактивных твердых отходов являются отработанные фильтры, обтирочные материалы, спецодежда, обувь, бумага, лабораторная посуда, перчатки и другие материалы, образующиеся в результате нормальной эксплуатации завода. Кроме того, в случае ремонта, замены, реконструкции возникают дополнительные твердые отходы: трубы, вентили, строительные материалы, загрязненные аппараты и оборудование и т.п. Перед переработкой эти отходы сортируют на сжигаемые и несжигаемые, прессуемые, а затем подвергают контролю на содержание плутония и других актиноидов.

ГОРЮЧИЕ ОТХОДЫ (бумага, дерево, пластикат, биологические отходы и др.) **СЖИГАЮТ** в печах с электрообогревом или с применением органического топлива. Образующуюся **ЗОЛУ** **ЦЕМЕНТИРУЮТ, БИТУМИРУЮТ** или **ОТВЕРЖДАЮТ** другими методами **И НАПРАВЛЯЮТ НА ХРАНЕНИЕ**. Выделяющиеся при сжигании **ГАЗЫ** **ПОДВЕРГАЮТ ОЧИСТКЕ**, как правило, в аппаратах с орошением, в результате чего образуются дополнительные жидкие отходы, требующие переработки. Негорючие отходы измельчают или режут, прессуют, после чего засыпают в бочки и цементируют.

ПЛУТОНИЙСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ перерабатывают разными методами в зависимости от уровня загрязнения. **ПРИ НЕВЫСОКОМ СОДЕРЖАНИИ ПЛУТОНИЯ ГОРЮЧИЕ ОТХОДЫ СЖИГАЮТ**, превращая в продукт, стойкий к выщелачиванию. **ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНОМ СОДЕРЖАНИИ ПЛУТОНИЯ В ОТХОДАХ** их предполагают **СЖИГАТЬ С ОБРАЗОВАНИЕМ ХОРОШО ВЫЩЕЛАЧИВАЕМОГО ПРОДУКТА, ИЗ КОТОРОГО ЗАТЕМ МОЖНО ИЗВЛЕКАТЬ ПЛУТОНИЙ**.

Помимо обычных печей для сжигания отходов **РАЗРАБАТЫВАЮТ КОНСТРУКЦИИ** для сжигания в расплаве солей, **МОКРОГО СЖИГАНИЯ В СМЕСИ АЗОТНОЙ И СЕРНОЙ КИСЛОТ, ПИРОЛИЗА ГОРЮЧИХ ТВЕРДЫХ ПЛУТОНИЙ-СОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**.

7.7. Захоронение отходов

Осуществление планов широкого промышленного использования ядерной энергетики предполагает необходимость **РЕШЕНИЯ** первоочередной **ЗАДАЧИ УДАЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИЗ СФЕРЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**. По проведенной оценке возможной опасности для биосферы Земли **ВРЕМЯ ПОЛНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВАО, СОДЕРЖАЩИХ АКТИНОИДЫ, ДОЛЖНО ПРИБЛИЖАТЬСЯ К 10^6 ЛЕТ**. В связи с этим понятно, что захоронение отходов сопряжено не только с преодолением технических трудностей долговременной изоляции ВАО в условиях непрерывного рассеивания тепла, генерируемого радиоактивным распадом, с учетом возможных климатических и геологических изменений, но и с долгосрочной социальной ответственностью перед будущими поколениями.

ДЛЯ УДАЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ было предложено **НЕСКОЛЬКО КОНЦЕПЦИЙ: ЗАХОРОНЕНИЕ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ; ЗАХОРОНЕНИЕ ПОД ИЛИ НА ДНО ОКЕАНА; ЗАХОРОНЕНИЕ В ЛЕДНИКОВЫЕ ЗОНЫ; УДАЛЕНИЕ ЗА ПРЕДЕЛЫ ЗЕМЛИ; ЯДЕРНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ (ТРАНСМУТАЦИЯ) АКТИНОИДНОЙ ФРАКЦИИ ВАО В СТАБИЛЬНЫЕ ИЛИ КОРОТКО-ЖИВУЩИЕ ИЗОТОПЫ**. Последние два способа рассматриваются в теоретическом плане и далеки от технического осуществления.

ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ В ЛЕДНИКОВЫЕ ОБЛАСТИ, в частности в Антарктиде, изучалось специалистами ряда стран. Такое захоронение вряд ли осуществимо из-за нестабильности ледниковой структуры в геологические периоды времени, ограниченного понимания геофизики льдов и отсутствия методов долгосрочного определения климата на Земле.

ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ В ОСАДОЧНЫЕ НАСЛОЕНИЯ И СКАЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ ПОД ДНОМ ОКЕАНА осуществимо в двух вариантах: **ПОДВОДНЫМ БУРЕНИЕМ ПОЛОСТЕЙ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ НА ОПРЕДЕЛЕННЫХ РАССТОЯНИЯХ**, необходимых для рассеивания тепла, с последующим запечатыванием поверхности породы над скважиной или **ОРГАНИЗАЦИЕЙ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА ОБТЕКАЕМОЙ ФОРМЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ**, когда развиваемая скорость обеспечивает проникновение в дно на глубину до 50 м.

Более дешевым способом могло бы стать **ЗАХОРОНЕНИЕ НА ДНЕ ОКЕАНА**, которое может быть реализовано простым погружением герметичных контейнеров с отвержденными отходами, стойкими к выщелачиванию.

Однако океан является неотъемлемой частью биосферы Земли, и его чистота должна охраняться не менее тщательно, чем другие объекты окружающей среды. В то же время современный уровень знаний о процессах, происходящих в глубинах океана, столь низок, что заставляет прибегать к весьма упрощенным моделям в прогнозировании возможного поведения отверженных отходов при длительном нахождении их в контакте с океаническими водами на большой глубине. Поэтому метод захоронения на дне океана и под его дном требует крайне осторожного подхода, и на него **В 80-Е ГГ. ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНВЕНЦИИ ВВЕДЕН МОРАТОРИЙ**, в результате которого были **ОСТАНОВЛЕНЫ ВСЕ РАБОТЫ ПО ПРОБНЫМ ЗАХОРОНЕНИЯМ**, проводимые, например, Японией и США **В ГЛУБОКИЕ ВПАДИНЫ ТИХОГО И АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНОВ**.

В США и Великобритании планируют **ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО** таким основным **НАПРАВЛЕНИЯМ: УЛАВЛИВАЮЩАЯ РОЛЬ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД, ДИСПЕРСИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТОЛЩАХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ВОД и БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗВРАТ АКТИВНОСТИ К ЧЕЛОВЕКУ.**

В современных условиях **НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНЫМ СПОСОБОМ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ЯВЛЯЕТСЯ РАЗМЕЩЕНИЕ ИХ ПОД ЗЕМЛЕЙ В ГЛУБИННЫХ УСТОЙЧИВЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ, КОТОРЫЕ СУЩЕСТВУЮТ ДОСТАТОЧНО СТАБИЛЬНО НА ПРОТЯЖЕНИИ МИЛЛИОНОВ ЛЕТ.** Многие страны имеют расширенные национальные программы по изучению свойств разных типов пород, их способности удерживать отходы на протяжении сотен тысяч лет, по отысканию оптимальных способов и условий захоронения. Обмен собранной информацией, международная кооперация и сотрудничество могут значительно ускорить выработку долговременной политики и способствовать строительству в некоторых странах централизованных хранилищ отходов (табл. 7.14).

В Западной Европе при ЕЭС разработан и выполняется план обращения с радиоактивными отходами, согласно которому **ОСУЩЕСТВЛЯЮТСЯ РАБОТЫ ПО НЕСКОЛЬКИМ ОБЪЕДИНЕННЫМ ПРОЕКТАМ И ПРОГРАММАМ.** Например, **ПРОЕКТ "PAGIS"** посвящен **ОЦЕНКЕ МЕТОДОВ ОБРАЩЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ,** **ПРОЕКТ "MIRAGE"** предусматривает **ИЗУЧЕНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОСФЕРЕ.**

Таблица 7.14. Состояние работ и планы по захоронению отходов в геологические формации

Страна, местоположение	Установка, объект	Порода	Дата начала захоронения и срок хранения
Бельгия, Моль	Подземная исследовательская лаборатория (совместно с Францией)	Глины	1984
	Хранилище САО, НАО и α -отходов	То же	~1995
Великоб-ритания, Харуэлл	Могильник САО	Граниты или глины	~1992 50 лет
Канада	Приповерхностное хранилище ВАО	Гранты или соль	90-е гг. после 2010 г.
	Подземная исследовательская лаборатория Могильник для кондиционированного ОЯТ или ВАО		
Франция	Подземная исследовательская лаборатория Могильник САО и НАО Приповерхностное хранение ВАО	Граниты	~1991 ~1990 (30-50 лет)

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Продолжение табл. 7.14.

Страна, местоположение	Установка, объект	Порода	Дата начала захоронения и срок хранения
Германия, шахта Ассе	Хранилище НАО	Соляные формации	1967
	Хранилище САО		1974
	Экспериментальное хранение 10 ⁵ шаровых ТВЭЛов		1977
	высокотемпературного реактора Экспериментальное хранение ВАО		1987
Рудник Конрад	Хранилище НАО и твердых отходов ядерных установок		1988
Горлебен	Хранилище-могильник	Соляные купола	~1995
США, Ханфорд	Хранилище отходов ядерного центра в Ханфорде	Базальт	80-е гг.
Карлсбад, Нью-Мексико	WIPP(Waste isolation pilot plant) – опытное хранилище для α-отходов военного происхождения, подземная лаборатория	Соляные формации	1989
Невада	Экспериментальный могильник ОЯТ	Туф	1998

Страна, местоположение	Установка, объект	Порода	Дата начала захоронения и срок хранения
Россия	Приповерхностное хранение ВАО	Соляные формации	
Швеция	Подземное хранилище для ОЯТ	Скальные породы	С 1985 (40 лет)
	Могильник кондиционированных и капсулированных сборок и ТВЭЛов топлива	То же	~2030

В третью программу ЕЭС включены **ПРОЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ-ЛАБОРАТОРИЙ** и перечень задач для этих лабораторий. При ЕЭС будут работать **ТРИ ЛАБОРАТОРИИ: В ГЕРМАНИИ** (в соляных шахтах Ассе, где такая лаборатория уже создана), **В БЕЛЬГИИ** (в глинистых формациях) и **ВО ФРАНЦИИ** (в гранитах).

В результате предварительной оценки разных типов пород **ПРИГОДНЫМИ ДЛЯ** более детального **ИЗУЧЕНИЯ И ДЕМОНСТРАЦИИ ОСУЩЕСТВИМОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ ПРИЗНАНЫ СОЛЯНЫЕ ФОРМАЦИИ** (Германия, Испания, Канада, Нидерланды, Россия, США, Швейцария), **АНГИДРИТ ИЛИ БЕЗВОДНЫЙ ГИПС** (Испания, Швейцария), **ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ – СЛАНЦЫ И ГЛИНЫ** (Бельгия, Великобритания, Испания, Италия, США, Франция), **КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ ТИПА ГРАНИТОВ** (Австрия, Великобритания, Дания, Испания, Россия, США, Франция, Чехия, Словакия), **ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ** (Индия, Канада).

ПЕРВЫЙ ЭТАП проводимых **РАБОТ** **ПРЕДУСМАТРИВАЕТ** **КОМПЛЕКСНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЙОНА ЗАХОРОНЕНИЯ В ОТНОШЕНИИ ГЕОЛОГИИ, ГИДРОГЕОЛОГИИ, ВОДОСОДЕРЖАНИЯ И ИЗОЛЯЦИИ ОТ ПОДЗЕМНЫХ ЦИРКУЛИРУЮЩИХ ВОД, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ И ЕМКОСТИ К РАДИОНУКЛИДАМ ВМЕЩАЮЩЕЙ ПОРОДЫ, ПРЕДЕЛОВ СОХРАНЕНИЯ ИЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЕЕ СВОЙСТВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК** и т.п.

Полученные результаты служат теоретическим основанием для систематизации подходящих формаций, для выработки принципов и критериев отбора площадок при организации опытно-промышленного захоронения отходов и конкретных рекомендаций таких мест.

К важным **КРИТЕРИЯМ ПРИ ВЫБОРЕ ПЛОЩАДОК ЗАХОРОНЕНИЯ ОТНОСЯТСЯ** кроме **ГЕОЛОГИЧЕСКИХ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ** также **СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА,** возможные **ТРАССЫ УТЕЧЕК АКТИВНОСТИ К ПОВЕРХНОСТИ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПОРОДЫ С МАТЕРИАЛОМ КОНТЕЙНЕРА И ОТХОДАМИ, ВОЗМОЖНОСТЬ РАЗРАБОТОК МИНЕРАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ОТДАЛЕННОМ БУДУЩЕМ.** Безопасность хранилища обеспечивается допустимой тепловой и радиационной нагрузкой на породу.

Проектирование и строительство хранилищ на выбранной площадке требует получения дополнительной информации **ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЕ ХРАНИЛИЩА, ПОРЯДКЕ, ЧАСТОТЕ И ГЕОМЕТРИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С ОТХОДАМИ, РАССТОЯНИЯХ МЕЖДУ СКВАЖИНАМИ ИЛИ КОЛОДЦАМИ, ПОВЕДЕНИИ ЗАПОЛНЕННЫХ КОНТЕЙНЕРАМИ С ОТХОДАМИ И ЗАПЕЧАТАННЫХ СКВАЖИН** и др.

Многообразие необходимых сведений и знаний предопределило широкий спектр проводимых научно-исследовательских работ и **РАЗНООБРАЗИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ ЗАХОРОНЕНИЯ**. Отходы низкой и средней активности на небольших глубинах захоранивались в течение многих лет в Великобритании, Канаде, США, Франции. Под контролем МАГАТЭ осуществлялось захоронение партий контейнеров с НАО и САО в Атлантический океан.

В Германии используют бывшую соляную шахту Ассе в качестве экспериментального хранилища, куда захоранивали сначала твердые кондиционированные низкоактивные отходы, а затем – упакованные в бетонные и стальные емкости среднеактивные отходы. Обследуется несколько соляных куполов для определения места хранилища ВАО в районе Горлебена.

В США в Ок-Ридже применяют МЕТОД ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПОРОДЫ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ СМЕШАННЫХ С ЦЕМЕНТОМ И ДРУГИМИ ПРИМЕСЯМИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ СРЕДНЕЙ АКТИВНОСТИ В ПЛАСТ ГЛИНИСТОГО СЛАНЦА. Рассматривают ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ИНЖЕКЦИИ ЖИДКОСТЕЙ В ИЗОЛИРОВАННОЕ ПОРИСТОЕ ОТЛОЖЕНИЕ ПОРОД ИЛИ ИСКУССТВЕННУЮ ТРЕЩИНОВАТОСТЬ В НЕПРОНИЦАЕМЫХ ФОРМАЦИЯХ. Изучают СОЛЯНЫЕ ФОРМАЦИИ, В КОТОРЫХ БУДУТ СООРУЖЕНЫ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ХРАНИЛИЩА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ИЛИ ОТРАБОТАВШИХ ТВЭЛОВ. Несолевые формации исследуют на испытательных площадках в штатах Невада, Вашингтон и Нью-Мексико.

Для повышения надежности захоронения рассматриваются КОНЦЕПЦИИ МНОГОБАРЬЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ. При этом предусматривается, например, ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ТВЕРДОЙ СТОЙКОЙ ФОРМЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ В ПРОЧНОЙ МАТРИЦЕ (стеклообразной или керамической), ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЕЕ В КОНТЕЙНЕР ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, РАЗМЕЩЕНИЕ В СКВАЖИНЕ, ОБЛИЦОВАННОЙ ЗАЩИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ, ОКРУЖЕНИЕ СКВАЖИНЫ СПЕЦИАЛЬНЫМИ ГЛИНАМИ типа бентонитов с высокой сорбционной емкостью и, наконец, БАРЬЕР ИЗ ОСНОВНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ФОРМАЦИИ, В КОТОРОЙ УСТРОЕНО ХРАНИЛИЩЕ.

Таким образом обеспечивают высокую степень безопасности для человека и окружающей среды.