

дение. Их состав и следует изучать. Подтверждением существования антивещества в нашей галактике авторы считают наблюдения космических объектов, излучающих настолько большое количество энергии, которое едва ли может быть получено за счет ядерных реакций. Если существование таких объектов будет доказано,

то только аннигиляцию можно считать достаточным источником энергии.

Идеи Альфвена и Клейна весьма привлекательны и могут оказать серьезное влияние на основные положения космологических теорий.

Н. В.

Симпозиум по переработке и захоронению высокоактивных отходов

Симпозиум был организован МАГАТЭ и состоялся в Вене в конце 1962 г. Он привлёк представителей 22 стран, нескольких международных организаций (МАГАТЭ, Евратом и др.), а также Зап. Берлина. Из 34 докладов, представленных на симпозиум, 15 было от США, 7 — от Франции, 5 — от СССР, 4 — от Великобритании, Бельгия, Чехословакия и Зап. Берлин представили по одному докладу.

На секции, посвященной концентрированию и хранению жидких высокоактивных отходов первым был заслушан обзорный доклад В. Бельтера (США).

Докладчик указал, что к настоящему времени в США накоплено более 200 тыс. м³ высокоактивных отходов (жидких и шламов), хранящихся в подземных емкостях. К 1980 г. США будут производить 150, а к 2000 г. — 1200 тыс. м³/год таких отходов.

Из возможных надежных методов захоронения (отверждение кальцинированием или остекловыванием и захоронение в соляных пластах или в глубинных формациях) Бельтер считает главным отверждение и захоронение жидких отходов в глубинные геологические формации, отдавая предпочтение отверждению. Благодаря прогрессу в разработке этого метода стоимость захоронения отвержденных отходов снижена с 1% от стоимости энергии до 0,2—0,4%.

Доклады Р. Томлинсона (США) были посвящены практике обращения с высокоактивными отходами при хранении их в подземных емкостях.

В США для хранения высокоактивных отходов построено 174 бака (из них 145 — в Ханфорде) объемом от 1,3 до 5 тыс. м³ (диаметром от 15 до 25 м, высотой от 5,4 до 9,75 м).

Практика хранения отходов в емкостях оказалась успешной, позволяя предотвратить их утечку или испарение, но этот способ требует постоянного обслуживания (отвод тепла из баков с саморазогревающимися отходами и контроль утечек методом отбора и анализа специальных проб из скважин).

Для неразогрываемых отходов обычно используют баки диаметром 22,5 м и высотой 5,4 м (объем около 2 тыс. м³). Стоимость его составляет 475 тыс. долл. Такие же баки со змеевиком охлаждения стоят в 3 раза дороже. В Айдахо применяют баки на 1200 м³ (диаметром 15 м и высотой 6,3 м), которые вместе с системой охлаждения стоят 800 тыс. долл. Используемые в Ханфорде неохлаждаемые баки емкостью 4 тыс. м³, снабженные системой улавливания продуктов испарения, стоят 750 тыс. долл. В них проводят процессы самоконцентрирования разогриваемых отходов за счет испарения воды. В Саванна-Ривер, где также используют последний метод, за все время эксплуатации только в четырех баках были обнаружены небольшие течи.

Стоимость хранения щелочных неразогрываемых растворов или соляных кеков в баках емкостью 5 тыс. м³

составляет 0,12 долл./л, а в баках емкостью 2 тыс. м³ — 0,22 долл./л. При хранении щелочных разогриваемых отходов в емкостях по 4 тыс. м³ эта величина возрастает до 0,25, с использованием же самоконцентрирования — до 0,42 долл./л.

Хранение кислых неразогриваемых отходов в баках емкостью 1,2 тыс. м³ стоит 0,5, а разогриваемых — 0,66 долл./л. Из этих данных следует, что при увеличении размера бака стоимость хранения значительно снижается.

Томлинсон считает, что выпарку неразогриваемых отходов можно производить непосредственно в баках, подавая туда воздух с температурой 800° С. Отходящий воздух с температурой 400—500° С очищают с помощью фильтров из стекловаты. Соли при этом выпадают в виде толстого соляного кека. Хотя постоянное хранение жидких отходов в баках дешевле выпарки, в Ханфорде считают, что проведение этого процесса в баках оправдано повышением уверенности в безопасности длительного хранения отходов.

М. Шамбон и Ж. Родье (Франция) описали обработку отходов в Маркуле. Жидкие отходы после упарки хранят в баке емкостью 60 м³. Охлаждение обеспечивается циркуляцией воды в бассейне, куда погружен бак, а также внутренними змеевиками. Ведется тщательный контроль за объемом, температурой и давлением в баке и активностью охлаждающей воды.

Д. Клеелленд сделал доклад о практике работы с высокоактивными отходами в Великобритании. Твердые отходы, образующиеся при механическом удалении облочков отработавших твэлов, хранятся в бетонных ямах и не требуют решения сколь-нибудь сложных технических вопросов.

От переработки одной тонны облученного урана получается 7 м³ жидких отходов с 2,4 Н азотной кислоты и общей активностью $-0,6 \cdot 10^6$ кюри. В результате упарки при давлении 7 мм рт. ст. и температуре 60° С их объем сокращается в 75—80 раз. Из конденсата извлекают азотную кислоту, кубовые остатки после дополнительной упарки, сокращающей их объем еще в 2 раза, направляют на хранение. Применяемые для этого баки имеют объем 150 м³. Английские ученые считают их более экономичными, несмотря на то, что при переходе к емкости 500 м³ стоимость баков возрастает немного более чем в 2 раза (без стоимости оборудования для охлаждения).

Доклад А. Н. Ефимова и др. (СССР) был посвящен влиянию нитратов на состав паровой фазы над водными азотнокислыми растворами. Показано, что при добавлении нитратов паровая фаза обогащается азотной кислотой. Отмечено взаимовысаливание азотной кислоты в паровую фазу и нитратов в твердую фазу.

А. Рагенбасс (Франция) рассмотрел выделение Cs¹³⁷ и Sr⁹⁰ из отходов 10—20-летней выдержки с целью

последующей переработки и окончательного удаления этих отходов. Разработанные методы выделения позволяют с помощью промышленной установки доводить очистку до $\sim 10^4$. Однако еще не решен вопрос использования полученных Sr^{90} и Cs^{137} , так как по крайней мере в настоящее время их полный сбыв исключен.

Р. Бредшоу (США) сообщил о результатах 170- и 499-дневных опытов по захоронению высокоактивных жидких отходов в соляные полости. Хотя при этом температура пластов доходила до 42 и $52^\circ C$, структурная устойчивость выработок не была нарушена. Испарение растворов с последующей конденсацией приводит к растворению стенок и верхней части купола. Кислые растворы вызывают химические реакции, в то время как нейтральные растворы в реакцию не вступали. Вода под воздействием облучения разлагалась на водород и кислород, что, возможно, требует вентиляции во избежание накопления больших количеств гремучей смеси. Было установлено, что твердые отходы неопасно хранить до температуры $900^\circ C$. Автор предлагает сорбировать жидкие отходы на твердых телах и в таком виде производить захоронение в соляные выработки, считая это более экономичным и безопасным.

Этот вывод представляется сомнительным, так как такой прием неизбежно вызывает значительное увеличение объемов и не устраняет испарение с последующей конденсацией, приводящей к изменению структуры выработки.

На сессии по отверждению жидких отходов и фиксации активности путем кальцинирования было заслушано 7 докладов. В. Реган и др. (США) указали, что кальцинированием удается резко снизить объем отходов, поступающих на захоронение; описан кальциатор, который в настоящее время разрабатывается в Брукхайвенской национальной лаборатории. Установка состоит в основном из медленно вращающейся горизонтальной трубы, обогреваемой печью сопротивления. Жидкие отходы впрыскиваются в печь через распределительное сопло и попадают на небольшой слой горячих шаров, где, собственно, и происходит кальцинация. Печь выполнена из инконеля-10, мощность привода 40 квт, рабочая температура $700^\circ C$, производительность переработки жидких отходов $12-20$ л/ч. Ведется конструктивная доработка уплотнения и системы впрыска жидкости. Кроме того, готовится к испытаниям новая установка производительностью 400 л/ч с диаметром барабана печи 90 см и длиной 6 м.

Доклад В. Винча и др. (США) был посвящен новому процессу кальцинации в расплавленной сере, разрабатываемому в Саванне-Ривер. В этом процессе на кислые водные отходы воздействуют расплавленной серой при $150^\circ C$, что ведет к испарению воды и летучих кислот, а химические соединения, содержащиеся в отходах, кальцинируются и восстанавливаются.

Дж. Бакхе и Дж. Мак-Брайд (США), представившие доклад о кальцинации отходов в псевдооживленном слое, пришли к выводу, что получаемый этим процессом продукт не обеспечивает безопасного захоронения. В связи с этим разрабатывается процесс превращения кальцинированного продукта в водонепроницаемый материал.

Р. Аллеман и др. (США) описали кальциатор производительностью 4 л/ч, состоящий из тигля, нагревателя с теплоизоляцией, форсунки с механизмом для ее замены, системы очистки отходящих газов, пробоборных устройств и приборного оборудования.

Об опытной установке для кальцинирования (в тиглях) отходов от переработки твэлов с алюминиевыми

оболочками было сообщено в докладе Дж. Бакхе и др. Кальциатор изготовлен из нержавеющей стали толщиной 18 мм со змеевиковым подогревателем, расположенным в зоне псевдооживленного слоя. Подогрев осуществляется расплавленным натрием. Подача материала колебалась в пределах $5-150$ л/ч на каждое расчетное сопло. Скорости воздуха для оживления псевдооживленного слоя брались от 15 до 75 см/сек. Лучшие результаты получены при скоростях менее 30 см/сек.

В Ок-Риджской национальной лаборатории разрабатывается процесс кальцинирования отходов в тиглях из нержавеющей стали, которые затем могут использоваться контейнерами для перевозки и окончательного захоронения. Дж. Холмс (США) описал процесс кальцинирования из предварительной упарки исходного раствора при следующей прокатки при температуре $400^\circ C$. Тигли имели размеры: диаметр 10 и 20 см, высота 60 и 250 мм.

Сравнительной оценке стоимости хранения отходов в баках и в тиглях после кальцинирования был посвящен доклад Дж. Перона и др. (США). При хранении отходов от переработки твэлов условной АЭС электрической мощностью 15000 Мвт в течение $0,5-30$ лет стоимость хранения в баках достигает $(1,5-9,7) \cdot 10^{-6}$ долл/квт·ч. При хранении в тиглях диаметром 50 , 60 см и длиной 3 м стоимость будет составлять $(0,87-5,0) \cdot 10^{-5}$ долл/квт·ч.

На сессии по отверждению методом остекловывания в докладе В. Кларка и В. Годби (США) описаны проводимые в Ок-Ридже лабораторные исследования превращения высокоактивных отходов в нерастворимые стеклообразные продукты. Как и во всех разрабатываемых в США процессах переработки высокоактивных отходов, здесь предусматриваются отгонка азотной кислоты, кальцинация, флюсование и плавка образующегося стеклообразного продукта. Показано, что по снижению летучести рутения фосфатные стекла выгодно отличаются от других. Прибавление $1,5-2$ М H_3PO_3 снижает летучесть рутения на два порядка. В описанных условиях летучесть цезия составляла $0,1\%$, а рутения — не более $0,5\%$. Изучение вымываемости осколков из полученных стеклоблоков показало, что она велика, если стекло содержит достаточного количества окислительных элементов.

В докладе Л. Хатча и др. (США) сообщается о процессе, разрабатываемом в Брукхайвенской национальной лаборатории. В последнее время создана усовершенствованная установка непрерывного действия производительностью $13,5$ л стекла в сутки.

В одном из трех докладов М. Эллиота и др. (Великобритания) дано описание опытной установки и сообщены результаты изучения стеклообразных продуктов различного состава и летучести рутения и цезия. Приготовление стеклообразной массы производится в печи тигельного типа с секционным электрообогревом. Тигель, представляющий собой цилиндр из нержавеющей стали, может служить в дальнейшем сосудом для захоронения полученных блоков. На опытной установке из слабоактивных имитирующих растворов были получены блоки весом до 50 кг. Спроектирована и построена опытная установка для получения стеклянных блоков с активностью до 1000 кюри. Во втором докладе изложены результаты исследования физико-химических свойств стеклоблоков разного состава. Показано, что облучение стекла (до 10^{11} рад) увеличивает выщелачиваемость из него урана и цезия. В третьем докладе, посвященном изучению летучести рутения и цезия в процессе остекловывания в зависимости от различных условий проведения

этого процесса, установлено, что цезий в основном летит на частицах пыли.

В двух докладах Р. Бонье и др. (Франция) изложены материалы исследований, проведенных в лабораторных горячих камерах и на макетных установках. Первый доклад был посвящен изучению отверждения отходов путем пропитки плиток прессованного стекловолокна (плотность 320 кг/м^3). Раствор выпаривали, затем пропитку повторяли, после чего плитки высушивали и плавили. Получали стекла с обычной добавкой стеклообразующих материалов. Работы проводили с растворами, имеющими удельную активность 2 кюри/л после четырех лет выдержки и, следовательно, содержащими весьма небольшое количество рутения, и со свежим раствором удельной активностью 140 кюри/л . Результаты изучения подтвердили хорошую стойкость получаемых стекол. Во втором докладе были описаны две модельные установки, одна из которых — непрерывного действия с вращающейся печью для кальцинирования отходов и соединенной с ней печью для плавки. Для предупреждения налипания внутри вращающихся стержней. 14 лет находятся два свободно движущихся стержня. Установка производительностью 100 л/день работала на меченых модельных растворах непрерывно около 100 ч , перерабатывая 10 мюри/день . В установке периодического действия процесс проводится в баке из инконеля высотой 1 м и диаметром 20 см . Подпитка, выпаривание и кальцинирование представляют собой одновременные операции, ведущие до заполнения бака, после чего в нем же проводится плавка. Нижняя часть бака имеет коническую форму и снабжена выпускной трубой. Вокруг выпускной трубы имеется кольцо, охлаждаемое воздухом, благодаря чему во время плавки в выпускном отверстии сохраняется твердая стеклянная пробка. На основе проделанных исследований проектируется и строится большая установка с двухметровым тиглем из коррозионноустойчивого и электропроводного силиката циркония и индукционным нагревом.

В докладе П. В. Зимакова и др. (СССР) была показана неоднородность получаемых при отверждении стекло-видных блоков, состоящих из плавящихся силикатов, растворенных в них окислов и непрореагировавшей фазы окислов. При взаимодействии с водой из таких препаратов в первую очередь выщелачиваются растворимые силикаты, чем и объясняется преимущественное выщелачивание Sr^{90} и Cs^{137} . Описано изменение свойств стекл разного состава в результате хранения при высоких температурах.

В работе Н. Е. Брежневой и др. (СССР) предложена распылительная сушилка с замкнутым циклом теплоносителя, что позволяет снизить до минимума сброс газов, подлежащих очистке. Изучена зависимость стойкости получаемых стекол от их состава, а также летучесть цезия как функция температуры.

Доклад П. В. Зимакова и др. (СССР) был посвящен использованию тепловыделения высокоактивных стекло-видных препаратов для плавления значительных масс стеклообразующей шихты, полученной из отходов средней активности. После остывания высокоактивные блоки оказываются заключенными в монолитный блок из малоактивного стекла, что повышает надежность безопасного захоронения.

Я. Ралкова и Я. Зайди (ЧССР) изложили положительные результаты обследования 14 сортов чехословацких глин и 3 видов стекол с целью фиксации изотопов цезия и стронция.

На секции по смешанным методам переработки высокоактивных отходов первым был заслушан доклад Л. Бетсле и П. Дежона (Бельгия) о методах извлечения цезия на цирконилфосфате и стронция на ферроцианиде молибдена или вольфрама. Для стронция и цезия получен высокий суммарный коэффициент извлечения (10^6) независимо от наличия микрокомпонентов.

Х. Леви (Зап. Берлин) изложил результаты изучения условий соосаждения некоторых осколочных элементов с окисью титана. Этим методом при определенных значениях pH могут быть извлечены с высокой эффективностью стронций (на $99,9\%$), редкоземельные элементы ($99,9\%$), цирконий и ниобий ($99,8\%$). Для цезия, рутения, иода коэффициенты очистки низки.

Небольшое сообщение П. Керре (Франция) было посвящено применению метода низкотемпературной упарки в вакууме вместо обычной высокотемпературной, которая приводит к потере летучих компонентов (например, рутения) и значительно снижает общий коэффициент очистки. Низкотемпературной упаркой (не более 30°C в конце процесса) в вакууме удалось сконцентрировать всю активность в сухом кубовом остатке с высоким коэффициентом очистки, составившим 10^6 .

Доклад В. И. Спичкина и др. (СССР) был посвящен изучению возможной миграции радиоактивных загрязнений из зоны захоронения. Было показано, что сорбция стронция и цезия на песках среднего зертнения с активной пористостью $\sim 30\%$ проходит раздельно. При десорбции грунтовой водой удаление радиостронция проходит лишь до содержания 10^{-9} кюри/л . В дальнейшем исследовании были направлены на определение распространения радиоэлементов в фильтрационном потоке.

Представленные на симпозиум материалы позволяют сделать следующие общие выводы:

1. В настоящее время все капиталистические страны, имеющие атомную промышленность, хранят свои жидкие высокоактивные отходы (после их концентрирования) в стальных емкостях. Главное отличие заключается в том, что в Великобритании и Франции применяют емкости сравнительно небольшого объема из нержавеющей стали и предварительную упарку отходов, а в США баки большого объема (до 5000 м^3) и нейтрализацию жидких отходов.
2. Капиталистические страны, обладающие мощной атомной промышленностью, обеспокоены все возрастающим количеством радиоактивных отходов; поэтому они развернули обширные работы по изысканию методов переработки этих отходов с целью приведения их в формы, позволяющие осуществить безопасное захоронение.
3. Подавляющее большинство исследователей признало остекловывание наиболее перспективным методом для окончательного захоронения отходов высокой активности. При этом кальцинирование считают промежуточной стадией этого процесса, так как его продукты не могут храниться без прочных оболочек.
4. Преимущества какого-либо из разрабатываемых процессов остекловывания пока неясны. Недостаточно отработанными являются также автоматизация процесса, очистка отходящих газов и даже выбор материалов.
5. Представляют интерес работы по упарке растворов досуха непосредственно в емкостях, однако этот метод требует тщательного удаления следов органики для предотвращения взрыва.
6. Предварительное выделение Sr^{90} и Cs^{137} представляет большой интерес, если будут найдены способы их полного использования.

Б. С. Кольчев