

Таблица 6

Процессы и объем производства

Процесс	Источник излучения	Объем производства в год
Сшивка полиэтиленовых изделий (труб, изоляций и т. п.)	Ускоритель	27млн. долл.
Сшивка полиэтиленовых пленок	»	1500 T
Облучение полупроводниковых деталей и схем	»	2.10 ⁷ шт
Производство этилбромид	Co ⁶⁰	400 T
Стерилизация	Ускоритель и Co ⁶⁰	28млн. долл.

и пшеничных продуктов, стерилизация бекона в жестяных консервных банках); облучение полупроводниковых устройств с целью улучшения их свойств; радиационное получение биологически окисляемых моющих средств; полимеризация этилена и сополимеров и другие процессы.

Работы в области хемоядерного синтеза находятся пока еще в исследовательской стадии. Разрабатываются хемоядерные процессы синтеза гидразина, NO₂, озона, радиационно-термического крекинга (РТК) нефтепродуктов и углеводородных газов с использованием осколков деления и реакторных излучений (292, 389).

Обсуждаются возможные типы реакторов для осуществления радиационно-химических процессов (542).

Активационный анализ. В течение последних нескольких лет нейтронный активационный анализ нашел широкое применение во многих странах, в том числе в Великобритании, СССР, США, Франции, ФРГ, Японии. Новая современная аппаратура значительно увеличила возможности активационного анализа и расширила границы его применения. Применение быстрых и импульсных реакторов позволяет значительно повысить чувствительность определения элементов, а также расширяет перечень элементов, определяемых методом активации.

Отмечается возможность применения для активационного анализа Am²⁴¹—Ве-источников нейтронов, имеющих преимущества по сравнению с Рb²¹⁰—Ве- и Рu²³⁹—Ве-источниками. Широкое применение небольших нейтронных генераторов в сочетании с совершенной малогабаритной транзисторной электронной аппаратурой позволяет сделать этот метод промышленным; в настоящее время он может эффективно конкурировать с другими методами элементного анализа в определенном диапазоне концентраций. Генераторы, дающие поток нейтронов 10⁹—10¹¹ нейтрон/сек с энергией 14 Мэв, эффективно используются для экспрессного анализа элементного состава образцов в тех случаях, когда химические методы требуют существенно больших затрат времени или обладают меньшей чувствительностью.

Значительное внимание уделяется такому важному вопросу, как увеличение срока службы тритиевой мишени, которое достигается применением радиоактивных ионных источников и другими способами (197).

В некоторых докладах (197, 829, 854) сообщается о новых областях применения активационного анализа: в криминалистике, исследованиях космического пространства, для определения солевого состава озер и т. д.

Применение изотопов и источников излучения в гидрологии и гидрогеологии*

Н. В. Чураев, А. И. Яковлев, М. П. Волорovich,
Н. Я. Флексер, С. Я. Вартазаров

Радиоактивные изотопы широко применяются в гидрологии и гидрогеологии для исследования открытых водных потоков, грунтового потока, миграции наносов и водного режима почв и грунтов, а также для решения многих инженерных задач.

В отличие от красителей и солей радиоактивные индикаторы, при соответствующем выборе, мало поглощаются грунтами и используются при более низкой концентрации, благодаря чему не изменяются ни свойства фильтрующейся жидкости, ни свойства грунта. Концентрация радиоактивного индикатора определяется с высокой точностью при помощи сравнительно несложной аппаратуры, причем окраска и засоленность воды практически не влияют на точность измерений.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУНТОВЫХ ПОТОКОВ

Анализ сорбционных свойств грунтов показывает, что наиболее подходящими радиоактивными индикаторами являются

* Подготовлено для Третьей международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964.

торами являются J¹³¹ в соединениях NaJ или KJ, хелатные соединения с Co⁶⁰, а также S³⁵ в виде раствора соли Na₂SO₄. Широкое применение в гидрогеологических исследованиях находит меченая вода T₂O, D₂O.

Повышение точности измерений расхода и скорости грунтового потока в результате применения радиоактивных индикаторов привело к необходимости уточнения некоторых расчетных формул, применявшихся для индикаторных методов. Первый из применяющихся методов [1] основан на наблюдениях за изменением концентрации индикатора, введенного в скважину. Расчетное уравнение для расхода установившегося грунтового потока *q* имеет при этом следующий вид:

$$q = \frac{W_0}{K\tau} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (1)$$

где *W*₀ — объем воды в скважине; *C*₀ — начальная концентрация индикатора; *C* — концентрация ко времени *τ*. Экспериментальная проверка этой зависимости была проведена с помощью радиоактивных индикаторов в фильтрационных трубках и грунтовых лотках. Сравнение результатов измерений расхода объемным методом на сливе и по уравнению (1) показало, что

при $K = 1$ измеряется расход воды, протекающей непосредственно через скважину. При распространении результатов измерений расхода на равное сечение грунта следует вводить $K = 2$, что связано с нарушением сплошности грунта [2].

Метод разбавления, как и все индикаторные методы, лучше всего применим при достаточно высоких скоростях фильтрации. В этом случае он обеспечивает возможность измерения расхода грунтового потока с ошибкой не более 3—5%. При скоростях фильтрации менее 0,1 см/сутки на результаты измерений существенное влияние оказывает диффузия индикатора, и точность измерений резко снижается. Следует отметить, что метод разбавления не требует предварительного определения направления грунтового потока и измерения разности пьезометрических уровней. Сорбция в грунте индикатора, вынесенного из скважины, не влияет на результаты измерений. Существенным преимуществом является также использование лишь одной скважины для проведения наблюдений. С помощью этого, наиболее перспективного метода можно вести систематические наблюдения за режимом грунтового потока, а также разовые измерения расхода воды. Метод используется как для определения средних значений расхода в грунте, так и для послойных измерений [3—5].

Вторым индикаторным методом является метод контрольных скважин. Теоретическое рассмотрение [5] зависимости концентрации радиоактивного индикатора M от времени опыта τ в контрольной скважине с учетом экспоненциального закона изменения концентрации индикатора в пусковой скважине привело к уравнению

$$M = \frac{W_0 C_0}{W_0 W_H} \left[\exp \left(-q \frac{(\tau - \tau_p)}{W_0} \right) - \exp \left(-q \frac{(\tau - \tau_p)}{W_H} \right) \right], \quad (2)$$

где W_0 и W_H — объемы воды в пусковой и контрольной скважинах соответственно; C_0 — начальная концентрация индикатора в скважине запуска при $\tau = 0$. Значение τ_p в уравнении (2) соответствует теоретическому моменту появления индикатора в контрольной скважине, которое и используется для расчета скорости движения воды. Уравнение (2) получено для переноса метки с постоянной средней скоростью $v_{ср}^*$ без учета диффузии индикатора и рассеивания его средой. Эти условия хорошо соблюдаются в однородных грунтах при достаточно высоких скоростях фильтрации. Способ учета распределения скоростей дается в работе [6].

Полученные уравнения были проверены в опытах с фильтрационными трубками и грунтовыми лотками с помощью радиоактивных индикаторов [5]. Результаты одного из опытов показаны на рис. 1. Линейная зависимость 3 характеризует изменение величины $\ln \frac{C_0}{C}$ в пусковой скважине. Зависимость $M(\tau)$ (кривая 1), построенная по уравнению (2), хорошо совпадает с экспериментальной (кривая 2), отклоняясь от нее лишь на начальном участке. Это отклонение обусловлено дисперсией скоростей движения воды в порах грунта, которую не учитывает теория. Последнее обстоятельство делает, к сожалению, невозможным прямое определение τ_p по графикам прохождения индикатора. Однако для определения можно использовать значения τ_m , хорошо совпадающие для теоретических

и экспериментальных кривых (рис. 1). Эти величины связаны зависимостью

$$\tau_m - \tau_p = \frac{W_0 W_H \ln \frac{W_0}{W_H}}{q (W_0 - W_H)}, \quad (3)$$

которую можно получить из (2), имея в виду, что при $\tau = \tau_m \frac{dM}{d\tau} = 0$. По времени τ_0 могут быть найдены также значения максимальной скорости движения воды в порах грунта.

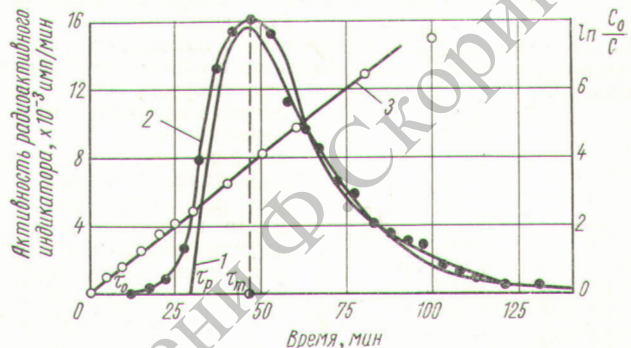


Рис. 1. График изменения концентрации радиоактивного индикатора S^{35} :

1 — теоретическая зависимость; 2 — контрольная скважина; 3 — пусковая скважина.

Сопоставление расходов воды, рассчитанных теоретически и измеренных в грунтовых лотках объемным методом на сливе, показало, что они отличаются не более чем на 3—5%. В случае больших расстояний между скважинами следует учитывать потери индикатора вследствие рассеяния — конвективной диффузии [7].

Радиоактивные индикаторы используются для измерения скорости и направления движения воды в различных грунтах и гидротехнических сооружениях. Одновременное применение метода разбавления и метода контрольных скважин позволяет измерять значение активной пористости грунта на участке между скважинами [5].

Удельная активность радиоактивного индикатора определяется по пробам воды, а γ -излучающих индикаторов — опускаемыми в скважину зондами с детекторами излучения, заключенными в водонепроницаемые корпуса [3]. Для запуска индикатора используются специальные приспособления, позволяющие вскрывать ампулу с раствором на определенной глубине.

Метод координатных измерений основан на наблюдениях за распределением в грунте радиоактивного индикатора, предварительно введенного в скважину. Измерения концентрации метки в грунте ведутся по координатной сетке путем отбора проб почвенными бурами, а также с помощью заглубляемых в грунты зондов. Нанося на разрез грунта значения удельной активности, можно проследить пути и скорости движения воды по отдельным горизонтам. Так, например, в опыте, результаты которого показаны на рис. 2, движение воды в осушаемой дренами торфяной залежи шло преимущественно по двум водопродвиющим горизонтам, разделенным относительным водоупором. Метод координатных измерений применяется при изу-

чении процессов осушения торфяных массивов [5, 8] и минеральных почв [9]. С его помощью можно также вести наблюдения за передвижением капиллярной влаги и воды атмосферных осадков в верхних слоях грунта.

В условиях гидротехнического строительства метод радиоактивных индикаторов был применен для исследования фильтрации в перемычках ограждения котлована Волжской ГЭС и на канале им. Москвы.

Радиоактивные индикаторы применялись и при исследовании фильтрации в эксплуатируемых береговой и русловой плотинах Горьковского гидроузла с целью определения направления, скорости движения и коэффициентов фильтрации [3]. Особенностью запуска являлось введение индикатора с помощью механического приспособления раздельно в основание и тело плотины. Было установлено, что скорость движения потока в основании русловой плотины больше, чем в ее теле. Метод радиоактивных индикаторов нашел применение и для исследования динамики переноса солей в грунте на моделях дренажных участков [10].

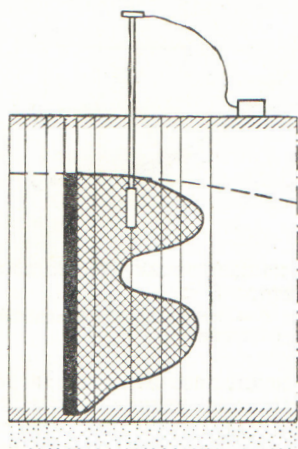


Рис. 2. Результаты исследования фильтрации воды в торфяной залежи методом координатных измерений (вертикальные линии показывают место погружения бонда).

Он применялся также для изучения процессов осушения торфяных месторождений. На основании этих работ составлена структурная классификация торфяных грунтов и даны рекомендации о наиболее рациональных способах их осушения. Отмечено, что в ходе осушения возможен переход залежи в результате уплотнения от одного структурного типа к другому. Обнаружен интенсивный перенос влаги в зоне капиллярной каймы в сторону открытых осушителей со скоростями, имеющими тот же порядок величины, что и скорости фильтрации. Изучен также характер передвижения воды в неосушенных торфяных массивах.

Метод радиоактивных индикаторов применялся и для исследования работы дренажных устройств. Проведенные по этой методике наблюдения за изменением рабочего сечения дрена и скорости движения в них воды в течение нескольких лет эксплуатации осушителей позволили изучить характер работы различных типов дренажа и сделать рекомендации относительно целесообразности его применения.

В лабораторных условиях метод радиоактивных индикаторов используется для исследования пористой структуры образцов грунта, измерения содержания различных категорий связанной воды, изучения механизма передвижения влаги в грунтах при ее испарении, капиллярном поднятии и термопереносе. Этим же методом исследовались процессы взаимного вытеснения из пористых сред двух несмешивающихся жидкостей, каждая из которых метилась своим радиоактивным индикатором (например, Rb^{86} и J^{131}) [11].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭРОЗИИ И ДИНАМИКИ НАНОСОВ

Радиоактивные индикаторы нашли применение и при изучении эрозионных процессов. Вводя радиоактивные индикаторы в размываемые или развезаемые породы, можно установить как интенсивность процессов разрушения этих пород под воздействием различных факторов, так и пути их переноса и аккумуляции.

Для изучения процессов развезания и переноса дюнных или аллювиальных песков в качестве индикатора применяют искусственно приготовленный или естественный песок с радиоактивной меткой, который размещают на различных элементах рельефа. Производя систематические измерения радиоактивности в исследуемом районе, можно изучать процессы развезания и переноса под воздействием различных факторов (направления и силы ветра, температуры, атмосферных осадков и т. п.). В качестве активированных веществ при проведении таких исследований могут быть использованы некоторые радиоактивные отходы производств, бедные порошковые руды радиоактивных элементов и радиоактивные изотопы (например, S^{35} , Cs^{134} , Co^{60} и т. п.).

Метод радиоактивных индикаторов может быть использован и при изучении процессов эрозии почв и сноса рыхлых пород, выветривающихся на склонах и берегах рек. Для проведения исследований порции активированного вещества распределяются на различных элементах рельефа в наиболее характерных точках — в квадратах площадью 1—3 м². Изучение миграции активного вещества на опытных квадратах производится систематическими замерами интенсивности излучения в ореоле их рассеяния, размыва и сноса по склону. На основании данных о перераспределении активности могут быть получены исходные материалы для количественных расчетов процессов эрозии и сноса рыхлых пород, выветривающихся на склонах и берегах водоема.

С большой эффективностью радиоактивные индикаторы используются при изучении процессов размыва берегов рек и переработки берегов водохранилищ. В зависимости от местных условий, определяющих интенсивность размыва, выбирается способ и место размещения активированного вещества в породах, слагающих берег. Если изучаемый берег слагается не скальными породами (глина, песок и т. п.), то с помощью радиоактивных индикаторов, помещаемых в изучаемые породы, можно достаточно надежно и эффективно провести необходимые наблюдения. На береговом склоне неглубокие скважины с меченым грунтом желательнее располагать на типичном по морфологии участке. В породах скального типа расположение скважин относительно бровки или бичевника берега выбирается также с учетом высоты обрушения размываемого берегового склона и интенсивности его размыва. Вводя периодические наблюдения за изменением интенсивности излучения на изучаемом участке берегового склона представляется возможным определить степень разрушения береговых пород. Следя же за дальнейшим движением активированного вещества, можно наблюдать за ходом разрушения берега и конечной его стадией — переносом и отложением материала разрушенных пород.

Для непосредственного наблюдения за перемещением наносов в береговой зоне моря также применяются радиоактивные индикаторы [12]. При изучении движения морских наносов в качестве индикатора использовался меченый изотоп Fe^{59} естественный песок,

взятый с исследуемого участка берега. Активированный песок был равномерно распределен в море на створе, ориентированном по нормали к берегу (рис. 3). Наблюдения за перемещением меченого песка производились путем проведения систематических радиометрических измерений на различных глубинах в контрольных створах, расположенных на заданных расстояниях от исходного створа. Применение радиоактивных индикаторов позволило определить направление, скорость и относительную интенсивность продольного перемещения песчаных наносов, а также выявить

твором радиоактивной соли (Zn^{65}) в морской воде с концентрацией $\sim 0,01$ мкюри/мл. Кроме этого, используются также соединения с изотопами Na^{24} , P^{32} , Br^{82} и J^{131} .

В опытах, поставленных в условиях приливно-отливных течений, установлено, что при слабой турбулентности течения облако индикатора распределяется сравнительно медленно и концентрация активирован-

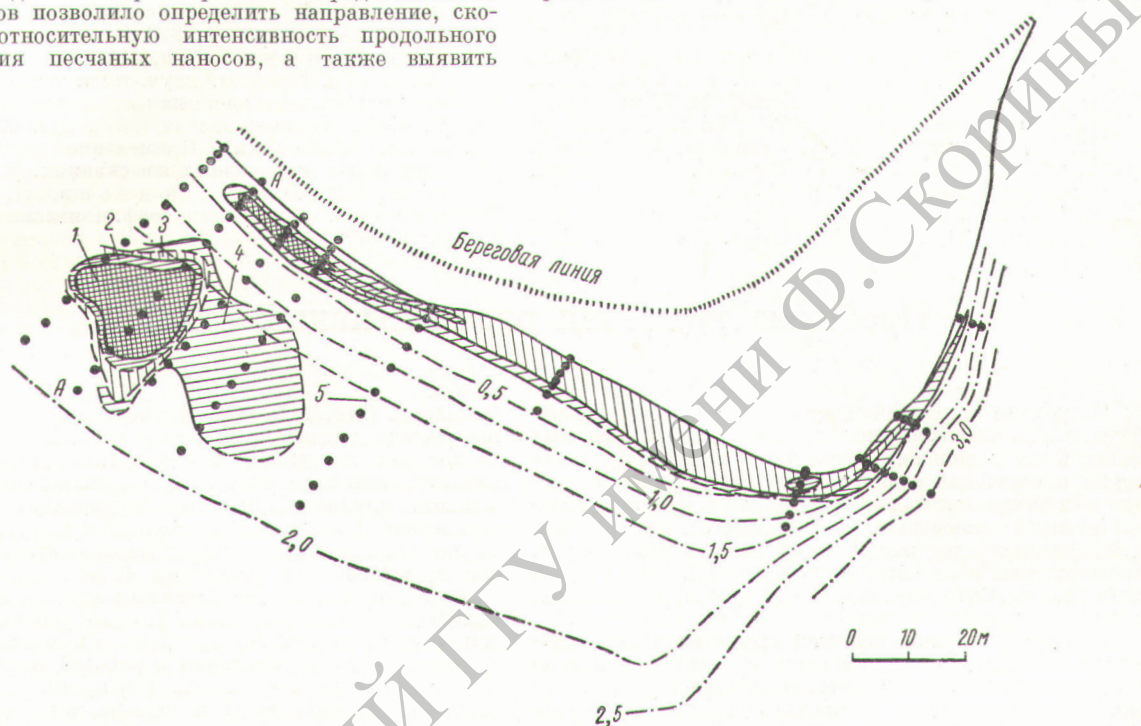


Рис. 3. Распределение активированного песка в пределах опытного участка через 18 ч после введения индикатора (АА — створ введения). Интенсивность излучения: 1 — более 400 имп/мин; 2 — от 300 до 400; 3 — от 200 до 300; 4 — от 110 до 200; 5 — точки радиометрических замеров.

некоторые качественные особенности этого процесса. В отличие от других методов применение радиоактивных индикаторов позволяет обходиться без сбора и камерального изучения проб наносов, а данные, характеризующие динамику наносов, можно получить непосредственно в момент наблюдения.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОТКРЫТЫХ ВОДНЫХ ПОТОКОВ

Изучение течений и процессов диффузии в морях, искусственных водоемах и реках с помощью радиоактивных индикаторов является еще одной из форм использования изотопов в гидрологических исследованиях. Для этих работ используются как β -, так и γ -излучающие изотопы. Как и при исследовании грунтовых потоков, применяются два метода измерений: 1) взятие проб с последующим определением их активности; 2) измерение активности детекторами непосредственно в среде.

Активированное вещество вносится в массу воды путем разбивания на заданной глубине ампулы с рас-

ного вещества превышает фоновую только вблизи места его введения. При отсутствии заметных течений распределение концентрации этого вещества примерно одинаково во все стороны.

Представляют интерес результаты, полученные зимой при измерении со льда. В одной и той же точке производились непосредственные измерения зондами и отбирались пробы. Эксперименты показали малую эффективность метода отбора проб. Пробы, взятые в момент прохождения максимальной концентрации индикатора, не дают воспроизводимых данных ввиду возмущения потока при отборе проб батометрами. Для получения полной картины процесса перемещения индикатора следует вводить в поток несколько датчиков. Эффективна система из нескольких датчиков, из которых один расположен вблизи контейнера, выбрасывающего радиоактивное вещество, а остальные — по кругу на некотором расстоянии, зависящем от скорости течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Каменский. Основы движения подземных вод. М., Госгеолиздат, 1943.

2. С. А. Коль. «Тр. Гос. гидрогеол. ин-та», Вып. 8 (62). М., Гидрометеиздат, 1948.
3. С. Я. Вартазаров, В. А. Волохов, Н. Я. Флексер, А. И. Яковлев. Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР. Т. 2. М., Гостехиздат, 1961; Н. Я. Флексер, О. П. Шипенко. «Разведка и охрана недр», № 6, 42 (1961); Н. Я. Флексер. «Гидротехн. стр-во», № 1, 28 (1963).
4. А. А. Абдулаев. «Узб. геол. ж.», 1, 57 (1962).
5. М. П. Волярович, П. И. Ильин, Н. В. Чураев. «Торф. пром-сть», № 7, 9 (1961); «Коллоидн. ж.», 23, 524 (1961); П. И. Ильин, Н. В. Чураев. «Торф. пром-сть», 5, 18 (1961).
6. О. Н. Носова. «Изв. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидротехн.», 69, 143 (1962).
7. В. П. Николаевский. «Прикл. матем. и механ.», 23, 1042 (1959); «Изв. АН СССР. Мех. и маш.», 5, 189 (1960); Сб. «Новые методы измерений и приборы для гидравлических исследований». М., Изд-во АН СССР, 1961.
8. Н. В. Чураев. «Торф. пром-сть», 8, 20 (1961).
9. В. А. Розин, В. И. Евдокимова. Осущение болотных и заболоченных почв. Минск, Изд-во АСХН БССР, 1960.
10. Т. А. Абдурагимов, С. Ф. Аверьянов, В. В. Рачинский. «Изв. Тимирязевск. с.-х. акад.», 1, 326 (1963).
11. Д. И. Лейпунская, А. Я. Пруслин. В кн. «Тр. Всесоюз. науч.-техн. конф. по применению изотопов и ядерных излучений в нар. хоз-ве». Т. 4. М., Госэнергоиздат, 1958, стр. 62.
12. Н. В. Глазов. Применение радиоактивных изотопов в инженерных изысканиях. М., Госатомиздат, 1962; О. К. Леонтьев, В. Н. Афанасьев. «Изд. океанограф. комиссии АН СССР», 3, 73 (1963).

Проблема удаления радиоактивных отходов

А. Н. Марей

Несколько заседаний Третьей международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях было посвящено обсуждению вопросов, касающихся обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии радиоактивных отходов предприятий атомной промышленности и атомных электростанций. Эти вопросы нашли отражение в докладах *, представленных на конференции Индией, ОАР, Советским Союзом, США, Францией, Чехословакией, Японией и др.

Принципы охраны внешней среды от радиоактивных загрязнений в США, Канаде и других странах по существу идентичны принятым в Советском Союзе. Все они преследуют цель уменьшить количество радиоактивных веществ в удаляемых отходах до таких уровней, при которых риск облучения населения будет ниже предельно допустимых доз, установленных Международной комиссией по радиационной защите и другими авторитетными организациями.

Способы, используемые для достижения указанной цели, различны. Основное внимание уделяется максимальному уменьшению количества жидких и газообразных отходов, подлежащих удалению в окружающую среду, прежде всего путем рационализации и усовершенствования технологических процессов. Этим вопросам были посвящены доклады СССР (379) **, США (278, 282, 869), Франции (86) и ФРГ (783). Одним из примеров, демонстрировавшихся участникам конференции в короткометражном фильме (США), является замена химического метода удаления (растворение) оболочек с облученных твэлов механическим, что практически исключает возникновение соответствующих жидких радиоактивных отходов. Не меньшее значение придается техническому усовершенствованию производственного оборудования и аппаратуры с целью снижения утечки радиоактивных растворов и газов в окружающую среду в количествах, представляющих

опасность (278, 282, 869). В некоторых случаях решение задачи достигнуто широким использованием легко сменяемых покрытий, что устраняет необходимость дезактивации поверхностей. Для дезактивации загрязненного крупногабаритного оборудования с успехом применяют дробеструйные методы и т. д. (869). Повторно используют первичный теплоноситель не только на промышленных реакторах (Ок-Ридж), но также и на реакторах, предназначенных для научно-исследовательских целей (379, 869). Так, заслуживают внимания некоторые данные, полученные при ознакомлении членов советской делегации с работой исследовательского реактора в Гренобле (Франция); при объеме дистиллированной воды в первом контуре реактора ~ 600 м³ оборот ее через ионообменные фильтры производится со скоростью 1600 м³/ч.

Большое внимание уделяется также переработке радиоактивных отходов и их контролируемому удалению. Этим вопросам было посвящено относительно большое количество докладов от нескольких стран: Бельгии (774), Великобритании (188), Индии (794), ОАР (813), СССР (587), США (278, 869), Франции (86, 88), ФРГ (783), Чехословакии (775).

Из представленных на конференцию материалов следует, что высокоактивные жидкие отходы, образующиеся на соответствующих производствах, хранятся в специальных подземных емкостях. При этом создаются условия, гарантирующие невозможность их поступления в окружающую среду не только при нормальной обстановке, но и в случае аварии.

Это достигается созданием нескольких «барьеров» в виде двух металлических и бетонной стенок емкостей (281). Хотя отверждение таких отходов стеклованием (188, 282, 587) и другими способами признается наиболее прогрессивным, однако из-за экономических и технических причин эти методы практически еще не вышли из стадии экспериментов и в производственных масштабах пока не используются.

Обезвреживание жидких отходов средней удельной активности (10^{-5} — 10^{-1} кюри/л) производится различно. В большинстве стран (США, Канада, Франция и др.) они подвергаются дезактивации с использованием различных методов. В частности, большое внимание уде-

* Перечень докладов советских ученых опубликован в «Атомной энергии», 17, вып. 3, 235 (1964), а список докладов зарубежных ученых — в «Атомной технике за рубежом», № 9, 27 (1964).

** В круглых скобках указаны номера докладов.