

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.1.047

**ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ\*)****Б. Коэн**

*Множество фактов убедительно свидетельствует о том, что высоко-радиоактивные отходы ядерных электростанций можно надежно захоронить в глубоких геологических образованиях.*

Проблему захоронения радиоактивных отходов часто называют одним из главных препятствий постоянному росту энергетического потенциала на основе строительства атомных электростанций, использующих процесс расщепления атомных ядер. В действительности эта проблема не столь уж трудна или неразрешима, какой ее считают многие. С тех пор как в 1957 г. Комиссия Национальной Академии наук США впервые предложила размещать эти отходы в глубоких, стабильных с геологической точки зрения скальных образованиях, накоплено значительное количество фактов, свидетельствующих о технической выполнимости, экономической выгоде и безопасности последствий такого решения. В последние годы появилось несколько новых предложений, в том числе использовать для захоронения радиоактивных отходов морское дно. Однако первый вариант по-прежнему остается наиболее приемлемым и предпочтительным решением проблемы хранения радиоактивных отходов.

Ниже будет рассказано о свойствах радиоактивных отходов, образующихся при работе ядерных реакторов, исследовано их возможное влияние на здоровье людей и окружающую среду и обсуждены планы их удаления в безопасные подземные хранилища.

□

Каковы же основные свойства радиоактивных отходов ядерных электростанций и чем они отличаются от отходов, образующихся при сгорании топлива в обычных электростанциях? Для сравнения было бы полезно рассмотреть сначала отходы, которые образуются при работе больших (~ 1000 Мвт) тепловых электростанций, работающих на угле. Здесь основным отходом является двуокись углерода — углекислый газ, который выбрасывается дымовыми трубами в количестве около 300 кг в секунду. Сам по себе этот газ не представляет опасности, однако выброс его в больших количествах при сгорании угля и сланца в атмосферу может оказать вредное долговременное влияние на земной климат. Самым неприят-

\*) Cohen B. L. The Disposal of Radiative Wastes from Fission Reactors.—Scientific American, June 1977, v. 263, No. 6, pp. 21—28. Перевод Г. И. Мерзона.

Бернард Л. Коэн — профессор физики, инженерной химии и нефтехимии, заведующий ядерными лабораториями Питтсбургского университета, США.

ным загрязняющим среду продуктом, образующимся при сгорании угля, является двуокись серы — сернистый газ, который выпускается в воздух в количестве около 5 кг в секунду. Согласно недавним исследованиям, проведенным по инициативе Национальной Академии наук США, выделение сернистого газа только одной тепловой электростанцией вызывает ежегодно около 25 смертных случаев, 60 000 заболеваний верхних дыхательных путей и создает убыток в 12 млн. долларов от коррозии различных материалов. Среди других токсичных газов, которые выделяются в атмосферу работающими на угле электростанциями, следует назвать окислы азота, являющиеся к тому же главным продуктом выхлопных газов автомобилей (большая тепловая электростанция выделяет их столько же, сколько 200 тыс. автомобилей), и бензпирен — основное канцерогенное вещество сигарет. Образуются также твердые отходы, главным образом в виде мельчайших частичек пыли. В США эта мелкодисперсная пыль сейчас считается вторым по опасности после сернистого газа агентом загрязнения воздуха. Всего тепловые электростанции дают около одной шестой всех пылевых загрязнений, создаваемых в результате деятельности человека. Наконец, имеются зольные отходы, которые накапливаются со скоростью приблизительно 15 кг в секунду.

Отходы ядерных электростанций той же мощности отличаются от отходов, образующихся при сгорании угля, двумя важнейшими особенностями. Во-первых, их количество в миллионы раз меньше. Объем приготовленных к транспортировке отходов, которые накапливаются в результате годовой работы 1000-мегаваттного ядерного реактора, не превышает 2 м<sup>3</sup>, т. е. их можно было бы уместить под обеденным столом. Несмотря на сравнительно небольшие количества радиоактивных материалов, при обращении с ними приходится применять весьма сложные методы, стоимость которых составляет не столь уж малую долю от стоимости произведенной электроэнергии. Эта стоимость для ядерной электростанции мощностью 1000 Мвт равна около 200 млн. долларов в год.

Вторая отличительная черта ядерных отходов состоит в том, что они опасны для здоровья людей не благодаря своим химическим свойствам, а из-за высокой радиоактивности, которой они обладают. Широко распространено заблуждение, что этот фактор не позволяет с достаточной определенностью оценить ту потенциальную опасность, которую представляют продукты ядерного расщепления для человечества, однако справедливым является как раз противоположное. Влияние радиации на человеческий организм известно гораздо лучше, чем действие химических веществ, которые загрязняют воздух, добавляются в пищу или используются в качестве пестицидов. Интенсивность радиоактивного излучения можно легко и точно измерить с помощью недорогих, но очень чувствительных приборов. Именно по этой причине радиоактивные изотопы столь широко используются в биологических и медицинских исследованиях. Кроме того, за эти годы была собрана обширная информация о реакции человеческого организма на интенсивное облучение, включая данные, полученные в результате атомных бомбардировок японских городов, при лечении больных с использованием различных видов радиации, а также при изучении последствий вдыхания радона шахтерами. Все эти данные были тщательно проанализированы национальными и международными научными организациями, например Комиссией по изучению биологического воздействия ионизирующего излучения Национальной Академии наук США, а также Научной комиссией по исследованию влияния атомной радиации при ООН. В результате этой работы были получены исключительно надежные оценки максимального влияния различных уровней радиации на организм человека.

□

Что же представляют собой радиоактивные вещества в отходах ядерного реактора и как они образуются? Ядерное топливо в реакторе на легкой воде (большинство ядерных электростанций США принадлежит к этому типу реакторов) является смесью двух изотопов урана: очень редкого

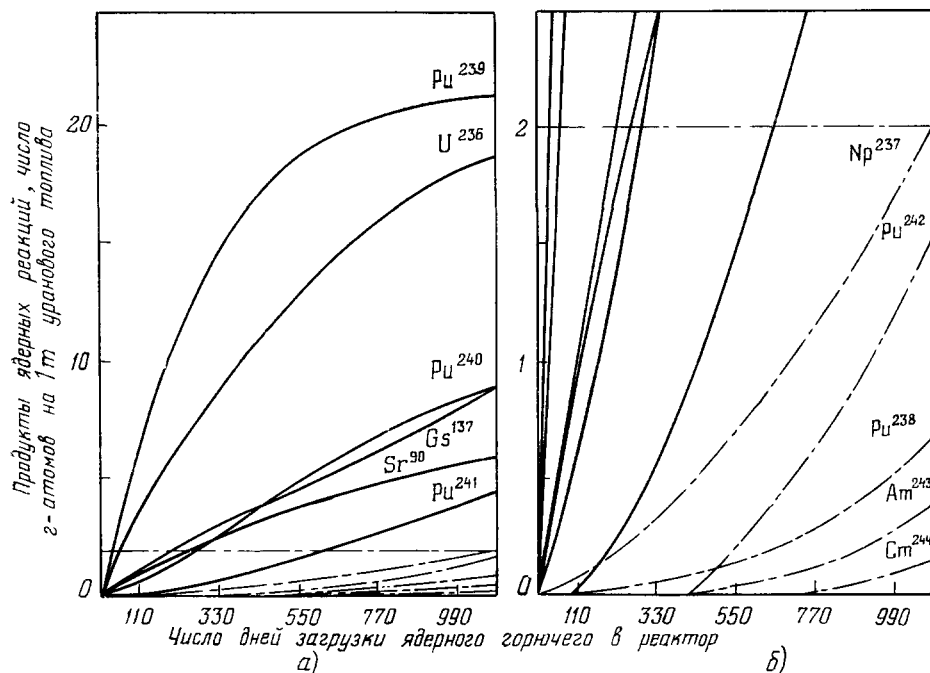


Рис. 1. Накопление продуктов ядерных реакций в расчете на 1 т урана в активной зоне типичного энергетического реактора на легкой воде в зависимости от времени. Приводятся данные за трехлетний период, в течение которого ядерное топливо находится в реакторе. (Рис. а) и б) отличаются масштабом вертикальной шкалы.) Сотни различных продуктов, которые образуются при расщеплении урана-235, входящего в состав ядерного топлива, представлены двумя наиболее характерными осколками деления — стронцием-90 и цезием-137 (в общей сложности около 5% общего количества). Все остальные изотопы, показанные на рисунках, образуются в реакциях превращения урана при захвате нейтронов, и в большинстве случаев сопровождаются радиоактивным распадом. «Выпотаживание» кривой для делящегося изотопа плутония-239 означает, что к концу периода времени, когда топливо находится в реакторе, этот изотоп участвует в реакциях ядерного расщепления и захвата нейтронов примерно с той же частотой, с какой он образуется в реакторе.

легко расщепляющегося изотопа урана-235 (с обогащением до 3,3%) и основного, в обычных условиях нерасщепляющегося изотопа урана-238 (96,7%). Ядерное топливо, приготовляемое из такой смеси, имеет вид керамических шариков двуокиси урана ( $\text{UO}_2$ ), которые заключены в трубки из нержавеющей стали или циркониевого сплава. Во время работы реактора нейтроны, образованные первоначально при делении ядер урана-235, сталкиваются с другими ядрами урана. При этом они либо расщепляют их на два тяжелых осколка и несколько нейтронов, поддерживая тем самым цепную реакцию, либо поглощаются, увеличивая атомный вес ядра-мишени на одну атомную единицу. В результате этих двух возможных типов ядерных реакций образуется большое количество разнообразных продуктов, выход которых изображен как функция времени на рис. 1 в течение трехгодичного периода, когда ядерное топливо обычно находится в реакторе.

Наиболее важной ядерной реакцией в реакторе на легкой воде является деление урана-235, при котором возникают сотни различных продуктов. Из них около 5% приходится на два наиболее характерных осколка деления — стронций-90 и цезий-137. Другая важнейшая реакция — захват нейтронов ядрами урана-238 с образованием плутония-239. (В действительности захват нейтронов приводит сначала к появлению урана-239, который затем в результате двухступенчатого радиоактивного распада превращается в плутоний-239.) Количество плутония в реакторе нелинейно зависит от времени работы последнего, поскольку образующийся плутоний сам принимает участие в ядерных реакциях. Так, например, ядро плутония-239 может расщепиться при попадании в него нейтронов или захватить нейтрон, образуя ядро плутония-240. Загиб кривой на рис. 1, а, отвечающей плутонию-239, означает, что в конце эффективного времени загрузки реактора ядерным топливом этот изотоп расщепляется в процессе деления почти с той же частотой, с какой он возникает при захвате нейтронов ураном-238.

Плутоний-240 также может захватить нейтрон и превратиться в плутоний-241, который в свою очередь либо делится, либо путем захвата нейтрона превращается в плутоний-242. Плутоний-242 при захвате еще одного нейтрона становится сначала плутонием-243, а затем путем последующего радиоактивного распада переходит в америций-243. В результате еще одного захвата нейтрона, сопровождаемого радиоактивным распадом, возникает в ощутимых количествах и кюрий-244. Аналогичная цепь последовательного захвата нейтронов, начинающаяся ураном-235, соответственно дает уран-236, нептуний-237 и плутоний-238.

□

Из каждой тонны урана, первоначально загруженного в реактор, к концу трехгодичного периода выгорает 24 кг урана-238 и 25 кг урана-235, что сокращает относительное содержание урана-235 с 3,3% до 0,8% (рис. 2). За это время вырабатывается 800 млн. киловатт-часов электроэнергии, а выгоревший уран дает 35 кг различных продуктов деления: 8,9 кг изотопов плутония, 4,6 кг урана-236, 0,5 кг нептуния-237, 0,12 кг америция-243 и 0,04 кг кюрия-244. Так как выгорает всего лишь 25 кг урана-235, причем одна пятая этого количества превращается в уран-236 и нептуний-237, то легко подсчитать, что за счет ядерного расщепления урана-235 производится только 60% энергии. 31% энергии дает расщепление плутония-239, 4% — расщепление плутония-241, а 5% энергии получается под действием быстрых нейтронов из урана-238. (Эти цифры являются средними за три года, в течение которых ядерное топливо обычно находится в реакторе.). К концу этого периода лишь 30% расщеплений ядер происходит в уране-235, против 54% — в плутонии-239, 10% — в плутонии-241 и 5% — в уране-238. Учитывая широко распространенное предубеждение против планируемого на будущее воспроизводства плутония в ядерных реакторах, следует указать, что плутоний уже сейчас интенсивно используется в качестве ядерного топлива.

После того как отработанное ядерное топливо извлечено из реактора, оно выдерживается несколько месяцев, чтобы произошел распад короткоживущих изотопов. (Это временное хранение очень важно, в частности, для распада такого изотопа как йод-131, одного из опаснейших продуктов деления, период полураспада которого составляет всего восемь дней.) Следующим необходимым шагом является отправка отработанного ядерного топлива на завод химической переработки, где топливные элементы разрезаются на мелкие куски, растворяются в кислоте и испытывают ряд

Первоначальное количество  
ядерного горючего (1000 кг)

Отработанное ядерное горючее (1000 кг)

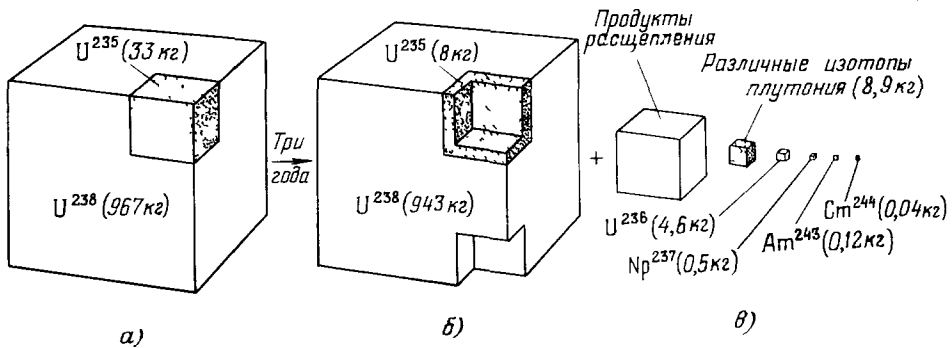


Рис. 2. Эта диаграмма дает наглядное представление о процессах изменения состава ядерного горючего в реакторе на легкой воде за трехлетний период.

На каждую тонну урана, первоначально загруженного в реактор (а), выгорает 24 кг урана-238 и 25 кг урана-235 (б), что приводит к сокращению степени обогащения ядерного горючего ураном-235 с 3,3 до 0,8%. Выгоревший уран дает 35 кг различных продуктов деления, 8,9 кг изотопов плутония, 4,6 кг урана-236, 0,5 кг нептуния-237, 0,12 кг америция-243 и 0,04 кг кюрия-244 (в).

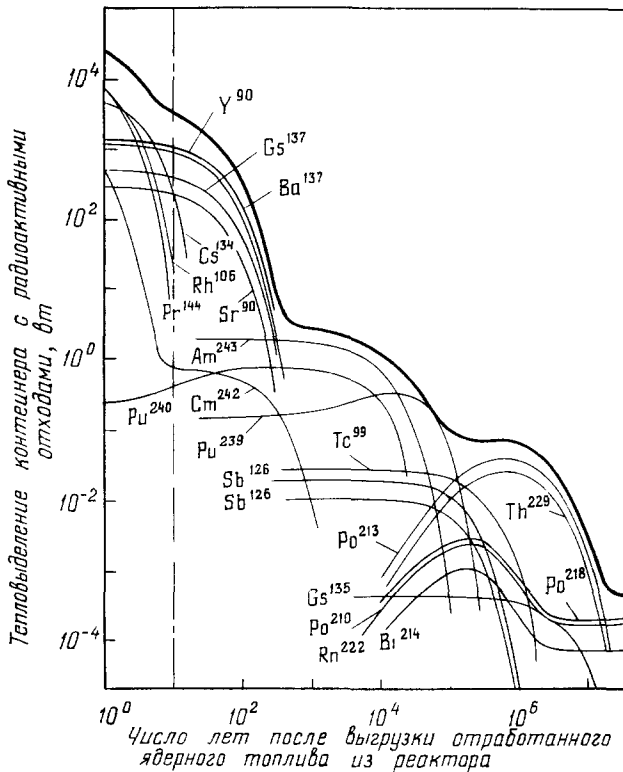


Рис. 3. Тепловая энергия, выделяемая различными радиоактивными изотопами, образующимися при сгорании ядерного топлива в атомной электростанции, должна быть безопасно отведена.

Это означает, что любой план длительного хранения контейнеров с высокорadioактивными отходами должен предусматривать их размещение на достаточно большом расстоянии друг от друга. Задача может быть существенно упрощена, если организовать промежуточное хранение отходов в течение ~10 лет (отделенная штрих-пунктирной вертикалью полоса слева), после чего тепло-выделение каждого контейнера снижается до 3,4 Вт. Отдельные тонкие кривые отвечают вкладу наиболее важных изотопов, а жирная огибающая кривая показывает полное тепловыделение.

других химических превращений, чтобы отделить уран и плутоний, используемые повторно в качестве ядерного топлива. Все остальное (за исключением некоторых газов, которые собираются отдельно, и кусков металлической оболочки топливных элементов, нерастворимых в кислоте) носит название высоко радиоактивных ядерных отходов. Кроме продуктов деления, ответственных за большую часть радиоактивности, эти отходы могут также содержать изотопы нептуния, америция и кюрия вместе со следами урана и плутония, которые не удалось отделить при переработке из-за неполной эффективности процесса химического разделения (рис. 3).

□

Простейшим и наиболее очевидным способом избавиться от высоко радиоактивных отходов (как только они начали накапливаться в достаточном больших количествах) было бы постоянно сбрасывать их глубоко под землю. Этот путь представляется достаточно безопасным, поскольку все скальные породы содержат следы естественных радиоактивных веществ, таких, как, например, уран, торий, калий и рубидий, а полное их количество, содержащееся в недрах США в слоях ниже, чем предполагаемая глубина захоронения 600 м, неизмеримо больше, чем все отходы, которые могли бы быть произведены, даже если вся электроэнергия получалась бы посредством ядерного расщепления. Хотя, безусловно, радиоактивность ядерных отходов более концентрирована, это не имеет решающего значения. Обычно принимается, что биологические последствия облучения линейно связаны с его дозой. Поэтому распределение данного количества радиоактивного вещества среди большого числа людей не изменило бы числа неблагоприятных влияний на их здоровье. Заметим, что если отказаться от такой «гипотезы прямой пропорциональности», то современные оценки потенциальной опасности ядерных отходов и всех других вредных последствий ядерной энергетики существенным образом понизятся.

Методы удаления высокорadioактивных отходов пока еще детально не разработаны. В существующих проектах предполагается вводить их в состав боросиликатного стекла, типа «пирекса», из которого затем будут изготавливаться цилиндрические стержни длиной порядка 300 см и диаметром около 30 см (рис. 4). Каждый стеклянный стержень будет в свою очередь заключен в толстую оболочку из нержавеющей стали. Такие стальные контейнеры с отходами будут затем транспортироваться в Национальное хранилище для захоронения. Отходы, образованные в результате годичной работы одной 1000-мегаваттной ядерной электростанции, уместятся в 10 таких контейнерах, которые будут размещены в 10 м друг от друга. Таким образом, каждый контейнер потребует площади 100 м<sup>2</sup>, а 10 контейнеров — 1000 м<sup>2</sup>. Было подсчитано, что полный переход США на ядерную энергию потребовал бы 400 1000-мегаваттных электростанций, способных дать до 400 000 Мвт в сравнении с 230 000 Мвт, вырабатываемых всеми электростанциями США в настоящее время. Соответственно высокорadioактивные отходы, ежегодно производимые всеми этими ядерными электростанциями, заняли бы площадь меньше половины квадратного километра (рис. 5).

Главная причина рассредоточения отходов на столь большой площади связана с необходимостью рассеяния тепла, вызванного их радиоактивностью. Проблема обращения с отходами, излучающими значительное количество тепла, сильно упрощается, если выждать в течение 10 лет после их переработки; за этот срок тепловая мощность, выделяемая контейнером, падает примерно до 3,4 кВт. Преимущества такого метода

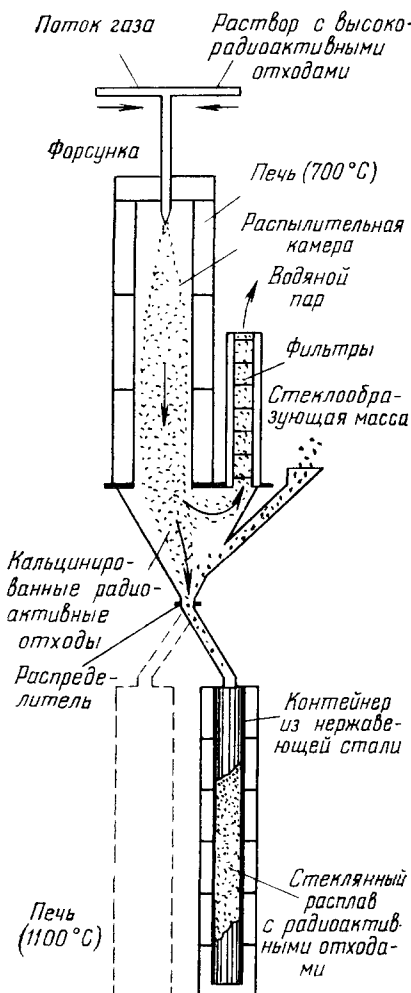


Рис. 4. План удаления высокорadioактивных отходов предусматривает введение их в состав боросиликатного стекла, из которого фабрикуются цилиндрические стержни длиной около 300 см и диаметром 30 см.

Показано, как растворенные в воде высокорadioактивные отходы методом кальцинирования в специальной камере превращаются в тонкодисперсный порошок (вверху), смешиваются со стеклообразующей массой (в центре) и переплавляются в стеклянный стержень внутри толстого контейнера из нержавеющей стали, в котором они могут быть потом захоронены (внизу). Как только контейнер заполняется, отходы с помощью распределительного клапана направляются в новый контейнер (обозначен штриховой линией), так что процесс является непрерывным.

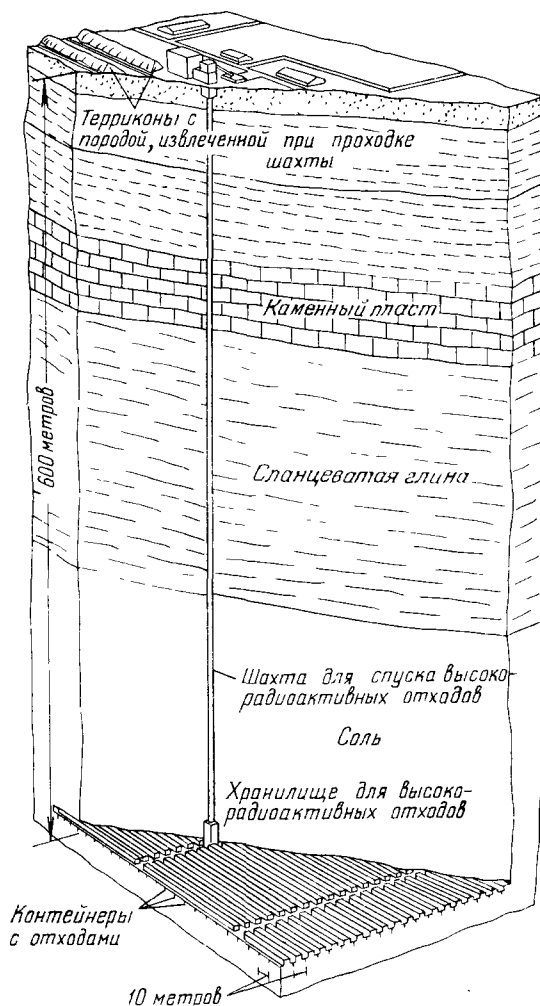


Рис. 5. В настоящее время большинство экспертов США в области ядерной энергетики считают, что размещение высокорadioактивных отходов глубоко под землей является наилучшим способом их долговременного захоронения.

В изображенной здесь идеализированной схеме проектируемого Национального хранилища в юго-восточной части штата Нью-Мексико контейнеры с отходами опускаются на глубину 600 м в геологически стабильные соляные пласты. Чтобы облегчить отвод тепла от контейнеров, они размещаются на расстоянии 10 м друг от друга. Таким образом, каждый контейнер занимает площадь около 10 м<sup>2</sup>. В этом случае для захоронения радиоактивных отходов, которые образовывались бы ежегодно всеми ядерными электростанциями США при полном переходе к ядерной энергетике (примерно 400 электростанций по 1000 Мвт каждая), потребовалось бы меньше половины квадратного километра.

видны более отчетливо, если выразить тепловой эффект через повышение температуры на поверхности контейнера, захороненного отдельно в скальной породе со средней теплопроводностью. Рис. 6 показывает, что захоронение с выдержкой в один год приведет к повышению температуры до 1900 °С, тогда как 10-летняя выдержка позволит уменьшить его до 250 °С. Различие оказывается весьма критичным, если учесть, что при температуре свыше 700 °С стекло расслаивается (кристаллизуется и становится хрупким). В скальных породах со средней теплопроводностью максимальный средний разогрев породы непосредственно над и под захоронением был бы достигнут через 40 лет, при этом температура повысилась бы до 140° (см. рис. 6). Если же разместить отходы в соляных пластах,

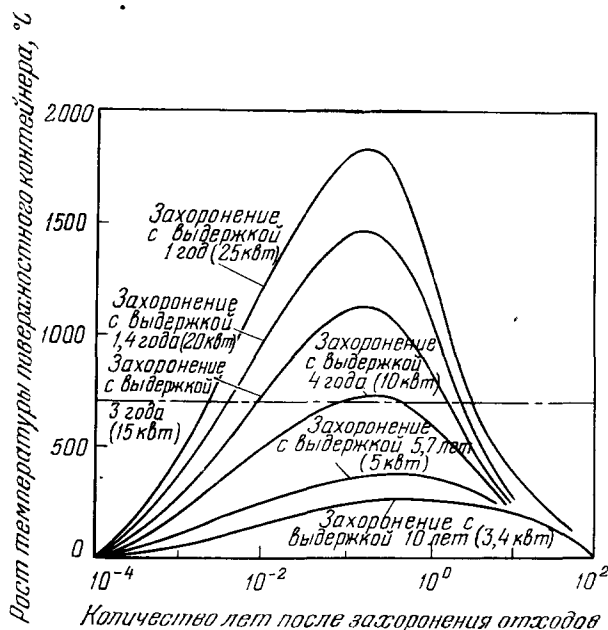


Рис. 6. Этот график иллюстрирует выгоду предварительной выдержки радиоактивных отходов в течение некоторого периода времени до захоронения.

Тепловыделение контейнера с отходами выражено здесь через температуру на его поверхности при условии, что он захоронен отдельно в скальной породе со средней теплопроводностью. Цифры около каждой кривой указывают тепловыделение контейнера (в кВт) по прошествии определенного периода времени (в годах). Захоронение после годичной выдержки (верхняя кривая) привело бы к росту температуры до 1900 °С, в то время как предварительная выдержка в течение 10 лет дала бы повышение температуры лишь до 250 °С. Часть рисунка выше штрих-пунктирной горизонтали отвечает той области температур (более 700 °С), где стекло расслаивается (кристаллизуется и становится хрупким).

которые обладают гораздо большей теплопроводностью, рост температуры на глубине захоронения через 40 лет был бы всего 85° (рис. 7).

В соляных пластах следует дополнительно принять во внимание эффект миграции воды в направлении разогретого контейнера с отходами. Типичные соляные образования содержат примерно 0,5% воды, собранной в мельчайших «карманах». Растворимость соли в воде растет с повышением температуры, так что если температура на одной стороне кармана увеличится, то в этом месте в раствор перейдет больше соли. Это приведет к возрастанию концентрации соли в воде, так что она станет выше точки насыщения при температуре, характерной для холодной стороны кармана, где соль и начнет высаживаться. В результате происходит миграция водяного кармана в направлении более высокой температуры, т. е. к захороненным ядерным отходам. Скорость миграции зависит от



того, насколько быстро возрастает температура с расстоянием и как сильно этот температурный градиент падает со временем (рис. 8).

Можно ожидать, что такой процесс приведет к тому, что около каждого контейнера будет собираться вода в количестве двух-трех литров в год. За 25 лет ее соберется около 25 л, причем в дальнейшем накопление

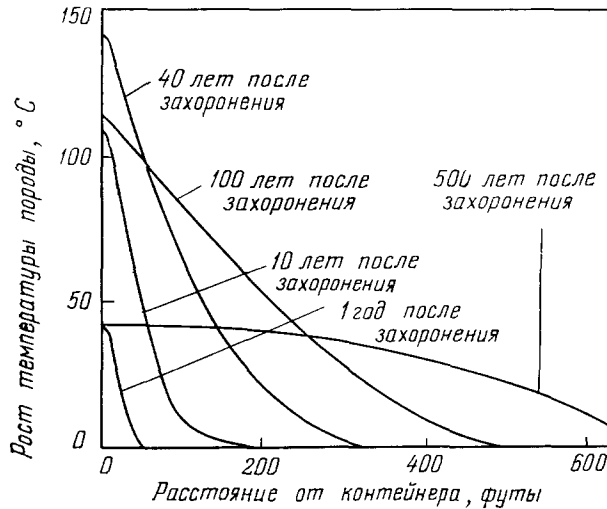


Рис 7. Максимальная средняя температура породы  $140^{\circ}\text{C}$  на глубине захоронения достигается через 40 лет после захоронения.

Если контейнер с радиоактивными отходами поместить в соляном пласте, то рост температуры будет значительно ниже

воды будет быстро уменьшаться. Так как температура на поверхности контейнера будет превышать точку кипения воды, то последняя, соприкасаясь со стальной оболочкой, будет превращаться в пар и выводиться

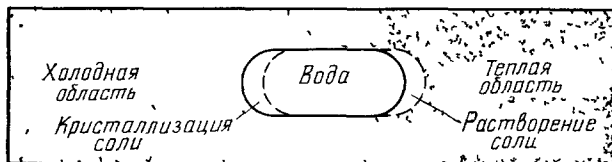


Рис 8. При захоронении контейнера с ядерными отходами в залежах соли тепло, выделяемое контейнером, будет вызывать миграцию включений, содержащих воду, в направлении более высокой температуры

Это происходит потому, что на более теплой стороне водяного кармана соль будет переходить в раствор (справа), а на более холодной — кристаллизоваться (слева)

вентиляционной системой наверх (предполагается, что захоронение ядерных отходов негерметично). Небольшие количества воды будут продолжать мигрировать к контейнерам с отходами и спустя 25 лет. Там под действием радиоактивного излучения будут происходить химические реакции между водой и солью, вызывая образование таких коррозионно-активных соединений, как, скажем, соляная кислота. Вот почему обычно считается, что оболочки из нержавеющей стали будут разъедаться, и содержащее ядерные отходы стекло рано или поздно придет в контакт с солью.



Как же оценить опасность, которую представляют для здоровья людей отработанные радиоактивные материалы? Самым непосредственным радиоактивным агентом является  $\gamma$ -излучение, испускаемое при распаде нестабильных ядер.  $\gamma$ -лучи очень похожи по своим свойствам на рентгеновские, но обладают еще большей проникающей способностью. Эффект, производимый  $\gamma$ -лучами (или любым другим ионизирующим излучением) на организм человека, принято измерять в единицах «бэр». Бэр отвечает интенсивности излучения, которая производит такой же биологический эффект, как облучение рентгеновскими лучами при дозе в 1 рентген. (Бэр означает биологический эквивалент рентгена.) Тщательный анализ влияния радиоактивных отходов на здоровье людей показывает, что следует опасаться лишь двух важнейших последствий, приводящих либо к заболеванию раком, либо к генетическим дефектам в хромосомах. Согласно наиболее надежным оценкам при полном облучении организма внешним источником  $\gamma$ -лучей дозой в 1 бэр вероятность смертельного заболевания раком составляет около 1,8 случаев на 10 000. Оценки степени возможных хромосомных нарушений при дозе облучения 1 бэр дают около 1,5 случаев на 10 000, причем эти дефекты затрагивают по крайней мере пять поколений. В дальнейшем мы будем говорить лишь о заболевании раком, однако следует помнить, что имеется сравнимое (хотя, как правило, несколько меньше) число генетических нарушений, также вызываемых облучением  $\gamma$ -лучами.

Биологические дефекты, вызываемые  $\gamma$ -излучением, в большинстве случаев приблизительно пропорциональны суммарной энергии  $\gamma$ -лучей. Это изображено графически на рис. 9, где указана суммарная энергия  $\gamma$ -излучения, испускаемого за 1 сек (в ваттах) всеми отходами ядерных электростанций США ежегодно в предположении полного перехода к ядерной энергетике. Из графика видно, что в период между 8 и 400 годами после переработки отходов основной вклад в  $\gamma$ -радиоактивность дает цезий-137 и непосредственный продукт его распада барий-137. В течение этого почти четырехсотлетнего периода общая интенсивность  $\gamma$ -излучения ядерных отходов падает больше чем на четыре порядка.

Наглядный способ осознать потенциальную опасность, которую представляет столь интенсивное  $\gamma$ -излучение, заключается в оценке последствий ситуации, когда его источник равномерно распределен по всей территории США. Число летальных заболеваний раком составило бы при этом многие миллионы. Отсюда ясно, что с материалом, который испускает столь сильное излучение, необходимо обращаться исключительно осторожно. С другой стороны,  $\gamma$ -излучение затухает примерно в 10 раз на каждые 30 см горной породы или каменной соли, так что при погружении отходов глубоко под землю их  $\gamma$ -излучение уже не представляет опасности.

Меры предосторожности, которые необходимо соблюдать при обращении с контейнерами, содержащими ядерные отходы, можно проиллюстрировать таким примером. Дозу облучения в 500 бэр, которая в половине случаев является смертельной, человек, находящийся в десяти метрах от неэкранированного только что приготовленного стального контейнера с отходами, получает за 10 минут. Однако создание достаточно хорошей защиты и эффективных средств дистанционной работы с такими контейнерами не представляет больших технических трудностей.

Если какие-либо из радиоактивных отходов попали бы в тело человека, то их биологическое действие усилилось бы, так как испускаемое ими излучение пронизывало бы ткани во всех направлениях, а само облучение продолжалось длительное время. Рассмотрим поочередно два основ-

ных пути проникновения радиоактивных загрязнений внутрь организма: с пищей и вдыхаемым воздухом. Мерой опасных последствий, связанных спервым обстоятельством, может служить число доз облучения, приводящих к заболеванию раком, от ежегодных радиоактивных отходов всех электростанций США при полном переходе к ядерной энергетике (рис. 10). Число  $10^6$

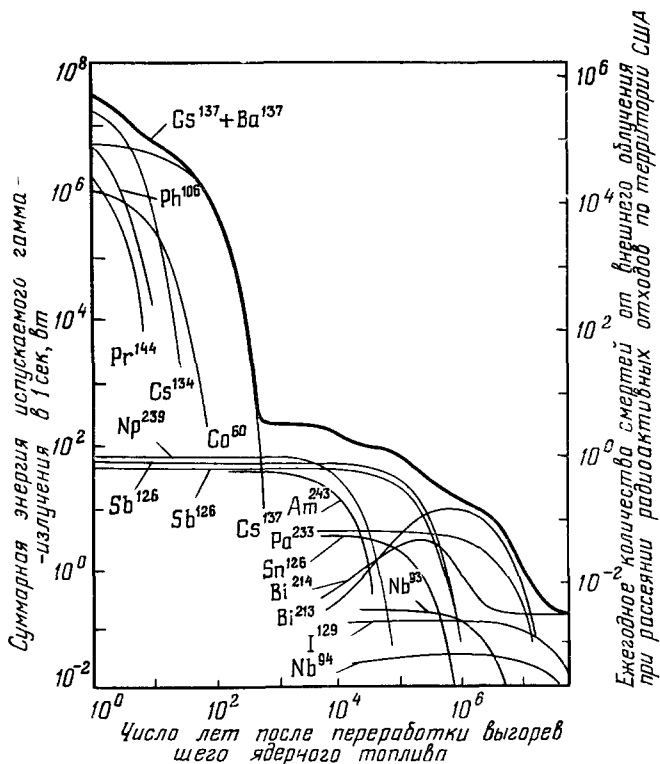


Рис. 9. Наибольшую непосредственную опасность представляет  $\gamma$ -излучение, испускаемое радиоактивными отходами при распаде содержащихся в них нестабильных атомных ядер.

Биологические дефекты, вызываемые  $\gamma$ -излучением, в большинстве случаев приблизительно пропорциональны его суммарной энергии. На левой вертикальной оси нанесены значения энергии  $\gamma$ -излучения, испускаемого в 1 сек различными радиоактивными изотопами, содержащимися в ежегодно накапливаемых радиоактивных отходах, в предположении, что вся энергетика США переведена на ядерную энергию (400 атомных электростанций по 1000 Мвт каждая). Толстая кривая показывает, что между восьмью и 400 годами после переработки отходов полная интенсивность  $\gamma$ -излучения и, следовательно, его опасные последствия уменьшаются на четыре порядка. По оси справа отложено общее количество ожидаемых летальных заболеваний раком ежегодно, если бы источник  $\gamma$ -излучения такой интенсивности был бы равномерно распределен по всей территории США.

на рисунке, отвечающее  $10^4$  лет, означает, например, что если бы все эти отходы по прошествии 10 000 лет были обращены в усваиваемую форму и употреблены в пищу, то можно было бы ожидать одного миллиона раковых заболеваний со смертельным исходом. Такой «крайне пессимистический» вариант предполагает, конечно, вовлечение в этот процесс многих миллионов людей. Однако ввиду обычно принимаемой в расчетах линейной зависимости между дозой облучения и биологическим эффектом, их действительное число не играет роли. Составление подобного графика является весьма непростой задачей, поскольку требует принять во внимание вероятность проникновения каждого радиоактивного вещества через стенки кишечника в кровеносную систему, а из крови в органы человеческого

тела, учета времени нахождения этого вещества в каждом органе, энергии излучения вещества и доли энергии, поглощаемой внутри органа, массы этого органа, относительных биологических эффектов различных видов

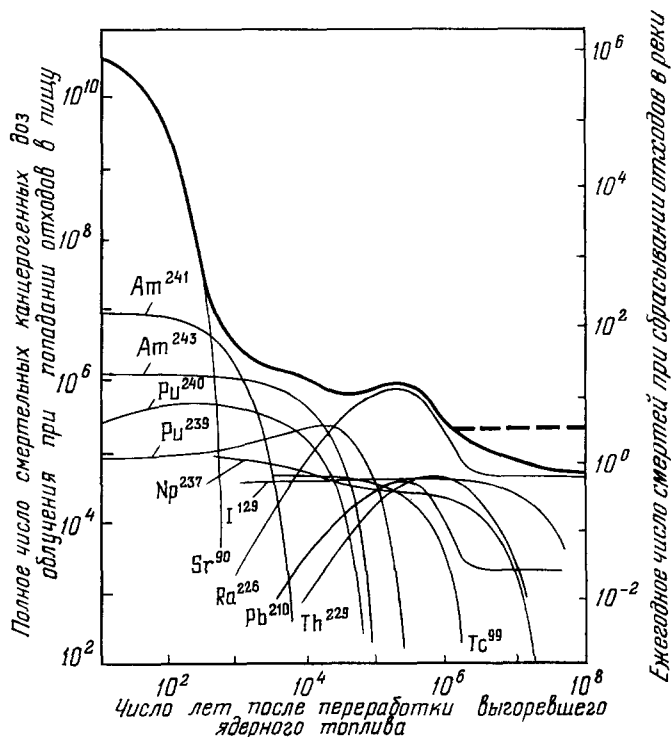


Рис. 10. Если бы все производимые ежегодно в США радиоактивные отходы попали в состав пищевых продуктов, то они оказали бы сильнейшее вредное влияние на здоровье людей.

График показывает, что в этом случае количество доз облучения, которому подверглось бы население, было бы столь велико, что даже если бы это произошло через 10 000 лет, можно было бы ожидать около миллиона легальных раковых заболеваний (левая шкала). Если же обратить все отходы в растворимую форму и сразу же после переработки спустить их в реки США, то это также привело бы к гибели миллионов людей (правая шкала). В расчетах предполагается, что все электростанции переведены на ядерную энергию.

излучений и, наконец, вероятности заболевания раком на единицу поглощенной радиации (в бэр).

□

Превращение всех радиоактивных материалов в пищевые продукты, которые затем могли бы быть использованы людьми, вряд ли является реалистическим прогнозом. Вместо этого можно рассмотреть последствия, к которым привело бы беспорядочное сбрасывание растворимых радиоактивных отходов в реки США. Как видно из рис. 10, такой, по-видимому, наиболее опасный вариант решения проблемы отходов, вызовет около миллиона смертельных заболеваний. Маловероятно, конечно, чтобы кто-нибудь прибегнул к этому способу, однако, очевидно, что в любом случае его следует признать неприемлемым.

Среди последствий, к которым влечет вдыхание радиоактивной пыли, наиболее тяжелыми необходимо считать заболевание раком легких.

Рис. 11 иллюстрирует результат наиболее опасной ситуации, когда радиоактивные отходы равномерно распыляются по всей территории США в виде тонкого порошка, свободно переносимого ветром.

В публичных заявлениях много внимания уделяется потенциальной опасности, связанной с ожидаемым количеством раковых заболеваний, при условии, что все образующиеся радиоактивные отходы вошли бы в состав пищи или были бы распылены в воздухе (правая шкала на рис. 10 и 11). Так, например, часто приходится слышать, что в отходах ядерной

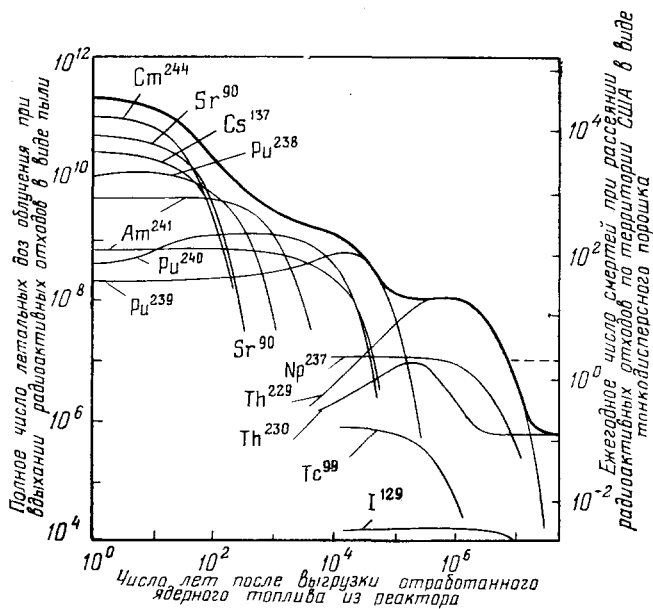


Рис. 11. Если бы все производимые ежегодно в США радиоактивные отходы попали при вдыхании в легкие людей, то это привело бы к массовым заболеваниям раком легких.

На левой вертикальной оси графика отложено количество доз облучения, приводящих к раковым заболеваниям, которое в этом случае получило бы население. На правой оси отложено число ожидаемых смертельных исходов благодаря вдыханию радиоактивной пыли, если бы все ежегодно образующиеся отходы были рассеяны в виде тонкодисперсного порошка над территорией США. На этом и предыдущем рисунках короткая прямая линия в правом нижнем углу графика указывает на долгосрочные опасные для здоровья людей последствия от естественной радиоактивности урановой руды, которая используется для производства ядерной энергии. (Предполагается, что все электростанции полностью переведены на ядерную энергию.)

энергетики содержится достаточно радиоактивности, чтобы уничтожить миллиарды людей. В связи с подобными утверждениями полезно сопоставить вредные последствия, связанные не только с радиоактивными отходами, но и с другими токсичными веществами, которые в больших количествах применяются в США. Подобное сравнение (рис. 12) показывает, что ядерные отходы не являются чем-то особо исключительным. Тем не менее, часто подчеркивается, что радиоактивные отходы остаются опасными в течение продолжительного времени. Следует помнить, однако, что нерадиоактивные барий и мышьяк токсичны всегда. Здесь могут возразить, что другие ядовитые вещества существуют в природе уже давно, тогда как ядерные отходы представляют собой совершенно новый источник опасности. Но около половины потребляемого в США бария и мышьяка импортируется извне и, следовательно, искусственно вносятся в окружающую среду. Существует также другой противоположный аргумент, на который очень редко обращается внимание, — что тщательного подземного захоронения химических ядов, как это планируется сделать с радиоактив-

ными отходами, не производится. Действительно, большая часть мышьяка используется в гербицидах и, следовательно, вносится в почву, подготовленную для выращивания пищевых культур.

Таким образом, приведенные выше количественные данные о потенциальной опасности тех или иных вредных веществ нельзя считать серьезными, пока не учтены возможные пути их попадания в окружающую среду. К этому вопросу мы сейчас и обратимся. Обычно все соглашались с тем, что наиболее опасные последствия для здоровья людей могли бы возникнуть в случае прямого контакта грунтовых вод с упрятыми глубоко

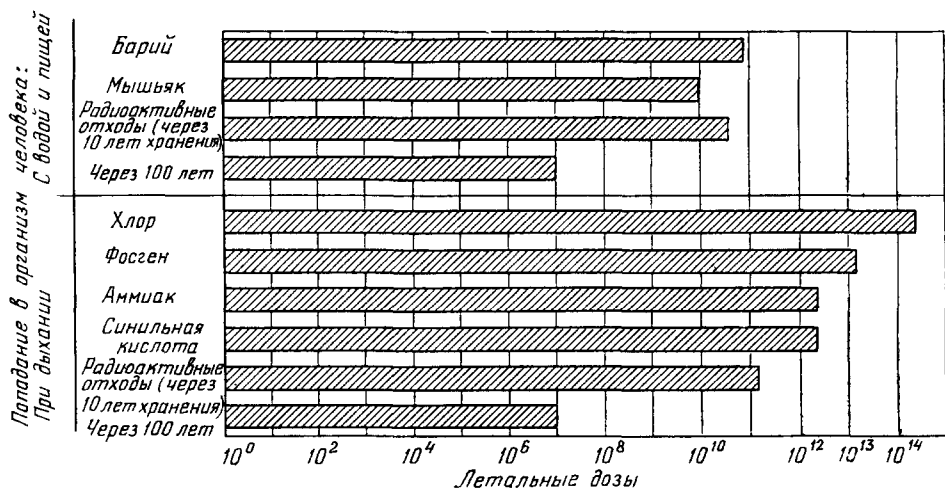


Рис. 12. Сравнение вредных последствий контакта с высокорadioактивными отходами ядерных реакторов и другими токсичными веществами, повсеместно используемыми в больших количествах в США, показывает, что первые не представляют собой особо исключительной опасности.

Более того, как отмечено в тексте, химические яды не подвергаются тщательному захоронению глубоко под землей, как это планируется сделать с ядерными отходами. Действительно, большое количество мышьяка используется в гербицидах и, следовательно, в широких масштабах вносится в почву в районах выращивания пищевых культур.

под землей радиоактивными отходами. Выщелачивание отходов и просачивание раствора через окружающую породу или соляные пласты наверх могло бы привести позже к попаданию их в питьевую воду или пищу и вызвать тем самым облучение людей. Из приведенного выше анализа последствий попадания радиоактивных веществ в пищевые продукты можно сделать вывод, что связанная с этим опасность наиболее велика в первое время, но резко уменьшается по прошествии нескольких сотен лет. Так, можно подсчитать, что спустя 600 лет хранения человек мог бы съесть с пищей около 200 г радиоактивных отходов, имея после этого 50%-ную вероятность остаться в живых. Естественно заключить отсюда, что крайне важно обеспечить надежную изоляцию радиоактивных отходов в течение первых нескольких сотен лет их хранения. Здесь мы хотели бы в первую очередь подчеркнуть эту проблему. Позже мы еще вернемся и к более долгосрочным последствиям.

Когда люди узнают, что ядерные отходы необходимо изолировать на сотни лет, их немедленный ответ состоит в том, что это практически невозможно. Социальные институты человечества, а также созданные им политические системы и структуры редко выдерживают столь длительное время. Однако такой ответ основывается на опыте, почерпнутом в условиях, встречающихся на поверхности Земли. При решении проблемы захо-

ронения радиоактивных отходов приходится иметь дело со скальными породами на глубинах около 600 м под землей. В этих совершенно иных условиях характерные временные интервалы, требуемые для существенных изменений, исчисляются миллионами лет.

На первые наиболее критические несколько сотен лет хранения радиоактивных отходов, помимо общих условий безопасности, существующих глубоко под землей, следует предусмотреть дополнительные меры защиты, заключающиеся прежде всего в том, чтобы любой мыслимый процесс высвобождения отходов обладал бы достаточно длительным временным запаздыванием. Наиболее важным из этих дополнительных предосторожностей является выбор места захоронения отходов, которое определяется в результате тщательного геологического обследования и не должно содержать подвижных грунтовых вод, даже в длительной перспективе. С геологической точки зрения несколько сотен лет являются коротким периодом времени, поэтому предсказания подобного рода могут быть очень надежными. Поскольку русла грунтовых вод могут меняться при землетрясениях, следует выбирать только тектонически стабильные области. В этом отношении соляные отложения обеспечивают дополнительную безопасность, поскольку соль под давлением обладает пластичностью. Таким образом, она может закрывать трещины, которые возникают в результате тектонической деятельности. Это свойство соли позволяет ей также заполнять пустоты, образующиеся при бурении, замуровывая контейнеры с отходами глубоко в недрах гигантской кристаллической массы.

Предположим, однако, что воде удалось проникнуть в трещины скальной породы, где захоронены радиоактивные отходы. Что может случиться дальше? Порода, конечно, должна быть выбрана водонепроницаемой, так что при ее выщелачивании, пока вода придет в контакт с остеклованной массой отходов, появится вторая задержка во времени. Может показаться, что в соляных пластах такого большого временного запаздывания ожидать нельзя, поскольку соль очень хорошо растворяется в воде. Однако это не так, поскольку содержание воды в глубоких подземных образованиях невелико, а масса соляных пластов огромна. Так, например, если все грунтовые воды, найденные сейчас в районе предполагаемого Национального хранилища радиоактивных отходов в штате Нью-Мексико, можно было бы направить в недра соляного пласта, то на растворение соли, окружающей годовое количество отходов ядерной энергетики, понадобилось бы 50 000 лет.

Третья задержка во времени связана с длительностью процесса выщелачивания самих отходов. Существует некоторая неопределенность в ее оценках, которые усложняются тем, что скорость выщелачивания быстро растет с температурой. Тем не менее, можно не сомневаться, что низкая скорость реакции выщелачивания стекла гарантирует безопасность по крайней мере на несколько сотен лет. Если новейшие исследования скорости этой реакции дадут иные результаты, то не представит большого труда вплавлять радиоактивные отходы в керамические или другие еще более инертные материалы.

Четвертая временная задержка связана с длительностью периода времени, который обычно требуется подземным водам, чтобы пробить себе дорогу на поверхность земли. Характерные скорости здесь исчисляются 30 см/сутки, тогда как расстояния составляют десятки и сотни километров. На преодоление 100 км со скоростью 30 см/сутки требуется около 1000 лет.

Однако радиоактивные отходы не могут перемещаться с той же скоростью, что и грунтовая вода, даже если они полностью перейдут в раствор, так как они будут отфильтровываться из него благодаря ионно-обменному

механизму. Например, ионы радиоактивного стронция, содержащиеся в ядерных отходах, часто вступали бы в обмен с ионами кальция горных пород, в результате чего ионы стронция прочно соединялись бы с горной породой, а ионы кальция увлекались бы водой. Ионы стронция, конечно, могли бы снова переходить в раствор, однако, вследствие продолжительной задержки этого процесса во времени, их перенос происходил бы в 100 раз медленнее движения воды, так что им потребовалось бы около 100 000 лет для выхода на поверхность земли. Для других важнейших компонентов отходов этот срок был бы еще больше.

□

Перечисленные аргументы дают нам уверенность в том, что за первые несколько сотен лет хранения, когда опасность наиболее велика, лишь крайне малая доля радиоактивных отходов могла бы быть вынесена на поверхность земли грунтовыми водами. Действительно, запаздывание

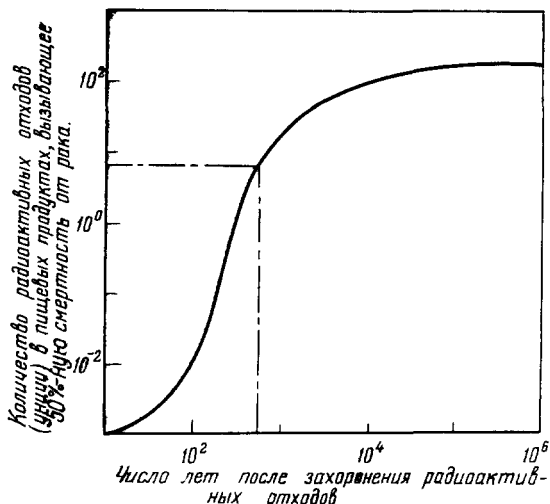


Рис. 13. Опасность, связанная с попаданием радиоактивных отходов в пищу, чрезвычайно велика в первое время, однако становится гораздо меньше через несколько сотен лет.

Как показано на рисунке, через 600 лет человек может «съесть» примерно 200 г радиоактивных отходов, подвергаясь 50%-ному риску смертельного заболевания раком. Проведенный расчет указывает на необходимость тщательной изоляции радиоактивных отходов в течение нескольких сотен лет. В дальнейшем контакт с отходами становится менее опасным.

этого процесса во времени, причины которого мы проанализировали, гарантирует безопасность их подземного захоронения на сотни тысяч лет. К этой цифре придется, однако, отнестись более осторожно после обсуждения потенциальной опасности продолжительного действия, которую несут в себе радиоактивные отходы.

Как мы убедились выше, после 600 лет хранения 50%-ная летальная доза радиоактивных отходов, переведенных в усваиваемую форму, составила бы около 200 г (рис. 13). Поэтому едва ли можно считать эти материалы сильнейшими ядами, и поскольку они хранятся в химически инертном виде на глубине 600 м под землей и тщательно изолируются от почвенных вод, их опасность еще более ослабевает. У себя дома мы порой держим яды куда более сильные. Нужно учитывать, однако, что ядерные отходы остаются радиоактивными в течение очень долгого времени, поэтому опасность могла бы проявиться неожиданно.



Чтобы установить степень такого долгосрочного риска, необходимо суметь оценить вероятность попадания радиоактивных отходов в окружающую нас среду. Каким же образом можно это сделать? Один из путей состоит в том, чтобы провести сравнение между атомами радиоактивных отходов, спрятанных на глубине 600 м, и атомами радия из породы или почвы над контейнером с отходами, предполагая, что они имеют одинаковые шансы попасть на поверхность Земли, а затем в организм человека. Такое предположение представляется достаточно консервативным, поскольку слова «порода» или «почва» над контейнером с отходами подразумевают и приповерхностные слои, где действуют силы ветровой эрозии, сменяют друг друга морозы и оттепели, текут талые воды, меняется растительный покров и т. д.

Рассчитать вероятность выхода атомов радия на поверхность земли в какой-либо определенной местности довольно трудно, однако среднюю вероятность для всей территории США оценить можно. Чтобы сделать наше сравнение убедительным, предположим, что радиоактивные отходы захоронены равномерно по всей территории страны, причем для расчета средних величин достаточно даже считать, что они распределены случайным образом, но всегда на одинаковой глубине. Формулируя наше предположение таким образом, мы обеспечиваем себе запас уверенности. Ведь очевидно, что располагая совокупной информацией из геологии, гидрологии и литологии, всегда можно выбрать место захоронения отходов гораздо более безопасное, чем при случайном выборе.

Сделав эти оба исходных предположения о случайном выборе мест захоронения отходов и равной вероятности выхода на поверхность атомов ядерных отходов и атомов радия, нам остается только оценить среднюю вероятность выхода атомов радия из 600-метрового поверхностного слоя территории США. Эта задача разбивается на две: определение вероятностей того, что атом радия попадет из почвы в реки, и что данное количество воды будет использовано человеком для еды или питья. Средняя концентрация радия в реках (два грамма на 10 триллионов литров) и общий годовой сток рек США (1,6 квадрильона литров) хорошо известны. Годовой перенос радия из почвы в реки равен произведению этих двух величин, т. е. 300 г. Поскольку радий является продуктом радиоактивного распада урана, то, зная среднюю концентрацию урана в горных породах ( $2,7 \cdot 10^{-6}$ ) легко подсчитать, что количество радия в верхнем 600-метровом слое континентальной платформы США составляет 12 млрд г. Вероятность ежегодного переноса измеряется отношением последней величины к полному количеству радия, т. е. равна  $2,5 \cdot 10^{-8}$  год<sup>-1</sup>. Обратная величина этой вероятности, — 40 млн. лет, — отвечает среднему времени жизни горных пород, образующих 600-метровый приповерхностный слой территории США. Таким образом, наше предположение привело нас к тому, что каждый атом захороненных радиоактивных отходов имеет менее одного шанса на 40 млн. выйти в течение года на поверхность. Около одной десятичной годового стока рек США попадает с пищей в организм человека. Однако благодаря различным процессам очистки употребляемая в пищу доля содержащегося в речной воде радия близка к  $1,5 \cdot 10^{-6}$ . Умножая последнее число на вероятность ежегодного выноса атомов радия в реки ( $2,5 \cdot 10^{-8}$ ), найдем, наконец, полную вероятность ежегодного проникновения атомов радия в человеческий организм. Она составляет приблизительно  $4 \cdot 10^{-13}$ .

Приведенный расчет страдает по крайней мере двумя неточностями. Он игнорирует попадание радия с пищевыми продуктами, что преуменьшает общую вероятность его проникновения в организм человека. Одновременно он предполагает, что весь радий оседает в теле человека, благо-

даря чему эта вероятность преувеличивается. Эти трудности можно обойти, одновременно упростив вычисления, если перейти к оценке числа заболеваний раком (12), вызываемых ежегодно употреблением в пищу продуктов, содержащих радий, и поделив это число на количество приводящих к заболеванию раком доз радия ( $30 \cdot 10^{12}$ ), содержащихся в 600-метровом приповерхностном слое территории США. Первая из этих величин получена в результате измерений содержания радия в трупах людей с учетом общепринятых норм риска заболевания раком под действием радия. Найденное таким способом значение вероятности ежегодного попадания радия в организм человека весьма близко к тому, что было получено раньше. Чтобы узнать теперь число ожидаемых ежегодных смертельных заболеваний, вызванных радиоактивными отходами ядерной энергетики США, следует масштаб левой вертикальной оси рис. 10 умножить на  $4 \cdot 10^{-13}$ .

Из всего сказанного вытекает, что после первых нескольких сотен лет хранения отходов, в течение которых мы надежно защищены благодаря временным задержкам развития опасных процессов, вредное действие накопленных за год захороненных отходов приведет не более, чем к  $10^{-6}$  случаев смертельных заболеваний ежегодно. Если суммировать эти цифры, то это даст около 0,4 смертельных случая за первый миллион лет плюс 4 добавочных случая за последующие 100 млн. лет.

□

Изучая влияние, которое радиоактивность окажет на здоровье человечества за такой продолжительный период времени, необходимо учесть также тот факт, что производство ядерной энергии основано на сжигании урана, главного источника радиоактивного облучения людей в наши дни. Так, например, при распаде урана, залегающего под землей на территории США, образуется такое количество радия, что вынос небольшой его части на поверхность приводит к 12 смертельным раковым заболеваниям в США ежегодно. Если предположить, что природный уран был бы захоронен столь же тщательно, как это хотят сделать с ядерными отходами, то его возможное влияние на здоровье человечества все равно оказалось бы более опасным, чем для последних. Иными словами, за миллионы лет ядерной эры сжигание урана сохранило бы больше человеческих жизней, чем было бы их унесено в результате вредного действия радиоактивных отходов.

Фактически, однако, потребляемый в настоящее время уран добывается в среднем не с глубины 600 м, а гораздо ближе к поверхности. Он является источником радона — высокорadioактивного газообразного продукта распада радия, который проникает оттуда в атмосферу. Радон — один из наиболее опасных источников облучения, содержащихся в окружающей нас среде, и согласно принятым нами методам подсчета последствий облучения его присутствие в атмосфере приводит ежегодно к гибели в США нескольких тысяч людей. Если принять во внимание этот дополнительный фактор, то сжигание урана в ядерных реакторах в течение одного года при переводе всей энергетики США на ядерную энергию позволит спасти около 50 жизней за каждый миллион лет, что более чем в 100 раз превышает цифру 0,4 — вероятные потери за это время, вызванные образованием ядерных отходов.

Таким образом, с точки зрения долговременной перспективы ядерная энергетика представляется средством очистки Земли от радиоактивности. Этот факт становится наглядным, если вспомнить, что каждый атом урана в конечном счете распадается с испусканием восьми  $\alpha$ -частиц (ядер гелия), причем четыре из них появляются сразу после образования радона. «При-

думав» процесс дыхания, природа облегчила радону прямой доступ вглубь нашего организма. В ядерных реакторах атом урана превращается в два атома продукта его расщепления, которые распадаются только испуская  $\beta$ -лучи (электроны) и в некоторых случаях  $\gamma$ -лучи. Около 87% этих распадов происходят еще до выгрузки радиоактивных материалов из реактора. Кроме того,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи примерно в 100 раз безопаснее  $\alpha$ -частиц, так как их энергия в среднем в 10 раз ниже, и выделяется она в тканях тела в гораздо менее концентрированной форме, что понижает их биологическую эффективность еще в 10 раз. Поэтому в длительной перспективе сжигание урана в ядерных реакторах уменьшает опасность для здоровья людей, связанную с радиоактивностью.

В этой связи уместно отметить, что среднее содержание урана в каменном угле составляет  $1,5 \cdot 10^{-8}$ , и что при сжигании угля этот уран попадает в окружающую среду. Радон, который образовывался бы ежегодно в результате радиоактивного распада урана, освобожденного при сжигании угля всеми электростанциями США (условно переведенными на уголь), вызвал бы около  $10^3$  смертей в каждые миллион лет, что на три порядка величины превышает результат, полученный для радиоактивных отходов энергетики США, полностью переведенной на ядерную энергию.

Если степень риска, связанная с попаданием радиоактивных отходов в питьевую воду и пищу, столь невелика, то как обстоит дело с вдыханием их вместе с воздухом в виде частичек пыли? Потенциальная опасность от вдыхания распыленных радиоактивных материалов значительно выше и существенно более продолжительна, чем при попадании с водой и пищей. Однако трудно себе представить, каким образом глубоко упрятанные радиоактивные отходы могли бы попасть в воздушную среду. Взрывы самых мощных атомных бомб не могут затронуть пласты на глубинах 600 метров. Метеориты соответствующего размера, способные сделать это, настолько редки, что ожидаемый от них эффект заражения атмосферы радиоактивной пылью в миллионы раз меньше, чем от попадания в пищу. Вулканические извержения в тектонически спокойных областях также крайне редки. Кроме того, они затрагивают ограниченные участки территории, так что их опасность на самом деле еще меньше.

Проникновение радиоактивности в грунтовые воды может привести к тому, что часть ее окажется рассеянной по земной поверхности в виде мелких твердых частичек. Однако расчеты показывают, что серьезная опасность заражения людей через дыхательные пути возникла бы лишь в том случае, когда вся радиоактивность полностью перешла из грунтовых вод в атмосферу. Часть отходов, попавшая таким путем на земную поверхность, могла бы представлять опасность и как источник внешнего  $\gamma$ -излучения. Однако соответствующие вычисления убеждают нас в том, что последствия такого облучения были бы гораздо слабее, чем от вдыхания радиоактивной пыли.

Ни в одном из рассуждений, которые приводились выше, не учитывалась возможность высвобождения ядерных отходов благодаря целенаправленному вмешательству человека. Попробуем сейчас рассмотреть и эту возможность. Захороненные отходы вряд ли представляют собой привлекательную цель для различного рода диверсий, поскольку их извлечение потребовало бы много времени, труда, оборудования и грозило бы облучением. Поэтому следует говорить только об опасности, сопряженной с неумышленной деятельностью человека, как, например, проходкой шахт. Существующий план предусматривает на этот счет государственную ответственность на все хранилища ядерных отходов, а также бдительный надзор и установление постоянных предупредительных знаков, так что такая проблема может встать только в случае полной гибели цивилизации.

Одним из критериев при выборе места захоронения отходов должно быть отсутствие ценных минералов и перспектив их обнаружения. (К примеру, основной фактор, задерживающий подготовку подземного хранилища в штате Нью-Мексико, заключается в возможном существовании там залежей поташа.) Тем не менее, даже в случае, если бы случайное поисковое бурение на этой территории проводилось столь же часто, как это, в среднем, делается теперь в США при бурении наугад нефтяных скважин, то опасные последствия все равно были бы много меньше, чем те, которые связаны с попаданием отходов в грунтовые воды. И если в этом месте все ж начались бы горные работы (скажем, для добычи минералов, которые сейчас считаются бесполезными), то их последствия сравнялись бы с последствиями проникновения отходов в грунтовые воды лишь в том случае, когда масштаб разработок приблизился бы к размерам всей современной угледобывающей промышленности США.

Захоронение отходов в соляных коях, по-видимому, представляет еще меньший риск с точки зрения возможности горных работ, поскольку соль очень широко распространена. Количество соли в недрах земли столь велико, что при случайном выборе любой данный участок окажется нетронутым в течение десятков миллионов лет. Здесь опять опасные последствия высвобождения ядерных отходов сравнимы с последствиями от их проникновения в грунтовые воды, с той лишь разницей, что в первом случае отходы присутствуют в нерастворимой форме, и им гораздо труднее попасть в ткани человеческого тела. Может показаться, что им легко было бы попасть в пищу вместе с солью. Однако лишь 1% добываемой из-под земли соли применяется в США для этой цели, к тому же соль очищается от нерастворимых примесей. Таким образом, роль этого канала понижается примерно до уровня, отвечающего использованию соли в промышленном производстве. В конечном счете вероятность утечки захороненных отходов благодаря деятельности человека меньше, чем через грунтовые воды.

□

Часто говорят, что созданием радиоактивных отходов мы возлагаем на плечи будущих поколений неоправданное бремя ответственности за их сохранность. Здесь прежде всего надо вспомнить, что наша оценка вредного влияния ядерных отходов, образующихся в течение одного года, при переходе всей энергетики на ядерную — 0,4 возможных смертельных случая в год — базировалась на отсутствии специальных мер их охраны. Эта оценка была получена путем сравнения с радием, причем никто не следит за тем, чтобы радий из существующих в стране залежей не попал бы в реки благодаря каким-либо действиям, связанным с перемещением грунта. Таким образом, охрана зарытых отходов послужила бы только сокращению того, что уже само по себе мало.

Даже если охранная служба будет признана целесообразной, ее организация не будет ни дорогой, ни трудной. После герметизации хранилища охранные мероприятия состояли бы только в периодической инспекции резервированной зоны, которая для тысячелетнего периода ядерной энергетики США составила бы всего 10 кв. миль. Задачей инспекции была бы проверка состояния предупредительных знаков, а также того, что никто не осмелился неожиданно начать горные работы или глубокое бурение. Дополнительно, время от времени из близлежащих рек и колодцев должны забираться образцы воды для проверки их на избыточную радиоактивность. Следовательно, мероприятия по охране отходов, накопленных за 1000 лет ядерной энергетики США, потребовали бы привлечения очень небольшого числа людей.

По-видимому, лучшим способом оценить бремя, связанные с радиоактивными отходами, которое мы возлагаем на наших потомков было бы сравнить его с другими обязательствами, уже возложенными на их плечи. Наверное, самые тяжелые из них — это последствия потребления нами высококачественных минеральных ресурсов планеты. За время жизни всего нескольких поколений мы полностью истощим все экономически рентабельные источники меди, олова, цинка, ртути, свинца и десятков других элементов, оставив на долю наших потомков значительно более скудные возможности использования этих материалов. Сверх того, сжигая сейчас миллионами тонн в сутки углеводороды — уголь, нефть и газ, мы лишаем будущие поколения людей не только источников топлива, но и сырья для производства пластмасс, органических химикатов, лекарств и других полезных продуктов. Эти последствия куда тяжелее любых возможных последствий надежного захоронения ядерных отходов.

Результатом такого сравнения является твердое убеждение, что единственным способом компенсации наших потомков за материалы, которых мы их лишили, было бы снабдить их совершенной технологией, способной обеспечить им достаточный комфорт и без этих материалов. Ключом к такой технологии должна быть дешевая и доступная в необходимых количествах энергия. Имея такой источник энергии и обладая присущей ему изобретательностью, человек сумеет использовать для замены других металлов практически неисчерпаемые запасы железа и алюминия, в качестве топлива — водород и т. д. Без дешевой и доступной энергии наши возможности будут гораздо беднее и, безусловно, должны повести нас вспять к примитивному существованию. Кажется очевидным, что мы, живущие сегодня, обязаны оставить нашим потомкам источник дешевой и доступной энергии. Единственным таким источником, который мы сейчас можем им гарантировать, является ядерное расщепление.

#### ЛИТЕРАТУРА

- High-level Radioactive Waste Management Alternatives/Eds. K. J. Schneider and A. M. Platt.— Battelle Memorial Institute, Pacific North-West Laboratories; 1974.
- Alternative Processes for Managing Existing Commercial High Level Radioactive Wastes: Nuclear Regulatory Commission Report NUREY-0043.— 1976.
- Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-fission Operations in the LWR Fuel Cycle: Division of Nuclear Fuel Cycle and Production.— Energy Research and Development Administration Report ERDA-76-43. 1976.
- Environmental Survey of the Reprocessing and Waste Management Portions of the LWR Fuel Cycle: Nuclear Regulatory Commission Report NUREY-0116.— 1976.
- Cohen B. L.— Rev. Mod. Phys., 1977, v. 49, p. 1.