

диодов, планарных диффузионных и эпитланарных, диодов на основе контактов металл — полупроводник и т. д. Диод с тонкой базой и неинжектирующим омическим контактом, представляющий собой устройство с резким восстановлением обратного сопротивления, был описан в докладе Л. А. Курановой и Ю. Р. Носова. Следует заметить, что эффект резкого восстановления обратного сопротивления в настоящее время широко используется для генерации импульсов субнаносекундного диапазона с временами нарастания 0,2—0,3 нсек и амплитудами ~ 10—30 в. Анализ схем такого типа и сами схемы, выполненные на диодах Д311, Д312, 1А401, 1А402, рассматривались Д. Ю. Эйдукасом.

Доклад Ю. С. Акимова и др. был посвящен анализу быстродействия планарной диодной матрицы наносекундного диапазона на кремнии р-типа.

В нескольких докладах были описаны наносекундные устройства, используемые с искровыми камерами (А. Т. Матюшин и др., Н. Н. Нургожин, М. А. Тапимов и др., ОИЯИ, СССР).

На симпозиуме проводились семинары и дискуссии по вопросам временного разрешения систем со счетчиками ядерных частиц и возможностям широкополосного коррелометра наносекундного диапазона, а также по стандартизации наносекундной аппаратуры, на которых были выработаны рекомендации.

Симпозиум способствовал широкому обмену мнений, установлению полезных личных контактов между учеными. Труды симпозиума будут опубликованы издательским отделом ОИЯИ в 1967 г.

Ю. К. АКИМОВ, И. Ф. КОЛПАКОВ

Симпозиум по удалению радиоактивных отходов в землю

С 29 мая по 2 июня 1967 г. МАГАТЭ и Евратом провели в Вене симпозиум по удалению радиоактивных отходов в землю. В его работе приняли участие более 120 специалистов из 24 стран. Было заслушано и обсуждено 43 доклада, из которых семь представлено советскими учеными.

Доклады были посвящены захоронению твердых и жидких отходов низкой и средней удельной активности в грунт, захоронению жидких радиоактивных отходов в глубинные формации земли, результатам длительных наблюдений за миграцией радиоактивных веществ при существующей в некоторых странах практике сброса жидких отходов в верхние слои земли, исследованиям вымываемости радиоактивных веществ из цемента, битума и стекла, вопросам, связанным с захоронением отходов в соляные копи, а также другим проблемам безопасного удаления отходов.

Значительное место в докладах было уделено захоронению твердых отходов низкой и средней удельной активности (бумага, ткань, загрязненное оборудование, строительные материалы и т. п.). На заводах в Уиндскейле (Англия), Саванна-Ривере (США) и научном центре Лос-Аламосе (США) захоронение указанных отходов производится на специально выделенных площадках в земляные траншеи шириной 8—30 м, глубиной 4—8 м. Длина траншей 150—700 м, объем 40—45 тыс. м³. После заполнения могильники засыпаются слоем земли. В Уиндскейле траншеи оборудуются центральной дренажной трубой. Анализы показывают, что в стекающей воде содержание α - и β -излучателей достигает $2,3 \cdot 10^{-10}$ кюри/л. На заводе в Саванна-Ривере твердые отходы сортируются и поступают на захоронение в упакованном или прессованном виде (рис. 1). За 1953—1966 гг. было захоронено 1,5 млн. кюри продуктов деления и активации и более 9000 кюри трансурановых элементов. В Чок-Ривере (Канада) твердые отходы средней и высокой удельной активности удаляют в траншеи с бетонными стенками. Ширина траншей 4 м, длина отсека 6—8 м, глубина 4—5 м. Отходы поступают в цементных контейнерах и автокраном устанавливаются в могильник. Некоторые виды отходов цементируются на месте хранения в деревянной опалубке и затем засыпаются землей (рис 2). Твердые отходы лабораторий и реакторов атомного центра Евратома в г. Испра (Италия) упаковываются в контейнеры, которые подвергаются захоронению в бетонных колодцах диаметром 1,2 м, глубиной 6—7 м. После заполнения колодца отходами его заливают цементом.

Заслуживает внимания метод хранения высокоактивных отходов, включенных в прокаленную окись алюминия. На заводе в Айдахо (США) с 1964 г. эксплуатируется опытно-промышленная установка кальцинации выдержанных растворов нитрата алюминия с удельной активностью 6 кюри/л. Кальцинация проводится в кипящем слое окиси алюминия при температуре 600—700° С. Для хранения прокаленной окиси алюминия используют цилиндрические емкости из нержавеющей стали высотой от 7 до 14 м и диаметром до 3,5 м. Эти емкости устанавливаются в бетонные вентилируемые камеры по четыре и семь штук в каждую. Температура в таком хранилище достигает 225° С вместо 400° С по проекту. Длительное хранение твердых кальцинированных отходов считается более безопасным, чем хранение того же количества жидких растворов. К настоящему времени накоплено 210 м³ радиоактивной окиси алюминия, полученной от переработки 1900 м³ раствора. В ближайшие годы на заводе предполагается создать могильник, в котором температура кальцинированного продукта при его хранении будет достигать 700° С.

На симпозиуме вызвал интерес доклад В. Г. Верескунова и др. (СССР) о возможности использования земляных могильников для проведения высокотемпературного процесса остекловывания отходов, основанного на использовании для их отверждения тепла химических реакций. Осуществление этого процесса позволяет получить большую производительность установки, снижает проблему подбора конструкционного материала печи плавки и обеспечивает надежность захоронения.

Значительное число докладов симпозиума было посвящено захоронению твердых радиоактивных отходов в соляные формации. Особое внимание этому методу захоронения уделяется в ФРГ, что обусловлено малой территорией страны и наличием больших соляных залежей. Для дальнейшего развития этого метода разработан проект создания хранилища путем размывания водой каверны внутри соляного пласта. Однако в этом случае возникает затруднение со сбросом соленых вод, образующихся при размывании соляной каверны. Кроме того, авторы проекта опасаются затопления каверны грунтовыми водами, что, по-видимому, иногда имеет место.

В докладах И. А. Соболева и др., В. В. Куличенко и др. (СССР) и Ж. Родье (Франция) были представлены результаты исследований выщелачивания радиоактивных изотопов из стекла, цемента и битума при их кон-

Р и с. 1. Транспортировка радиоактивных отходов в упакованном виде в могильник.



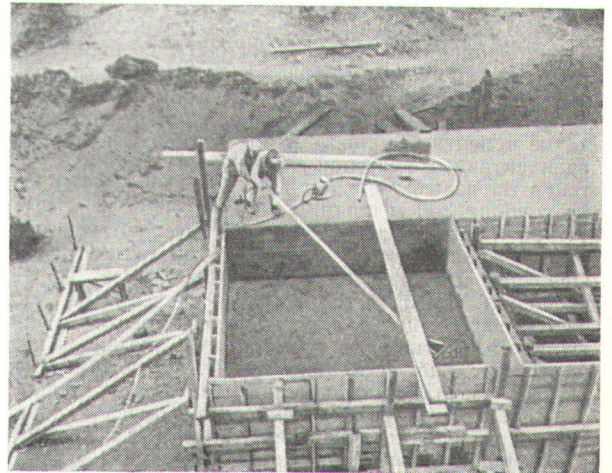
такте с водой. В этих сообщениях отмечается, что захоронение цементированных и битумированных отходов средней удельной активности должно осуществляться в гидроизолированные бетонные траншеи.

У. Меритт (Канада) сообщил о результатах захоронения двух партий радиоактивных стекол в землю ниже уровня грунтовых вод. 25 блоков стекла активностью 300 кюри были помещены в грунт вблизи Чок-Ривера в 1958 г. и 25 блоков менее стойкого стекла активностью 1100 кюри в 1960 г. Анализ проб почвы в течение всего периода хранения подтверждает, по мнению автора, пригодность удаления высокоактивных отходов в виде стекла непосредственно в грунт.

На симпозиуме были подведены итоги двадцатилетней американской практики сброса жидких радиоактивных отходов средней и низкой удельной активности непосредственно в грунт. В Ханфорде 23 млн. м³ жидких отходов, содержащих 3 млн. кюри радиоактивных веществ, были слиты в болота, траншеи и специальные колодцы. Предполагалось, что высокая сорбционная способность почвы и низкий уровень грунтовых вод в этом районе (60—100 м) приведут к полному поглощению радиоактивных изотопов. Однако, как следует из доклада С. Бирда и У. Годфри, в настоящее время радиоактивные изотопы достигли уровня грунтовых вод, причем Ru¹⁰⁶, Tc⁹⁹ и H³ практически не сорбируются почвой, обнаружены на расстоянии 22—23 км от места сброса и уже загрязняют реку Колумбия. Указанные наблюдения подтверждены в докладе Д. Брауна, который сообщил о результатах анализа проб грунта, взятых при бурении специальных скважин в районе сброса отходов. Продолжающееся распространение Sr⁹⁰ и Cs¹³⁷ может привести к неприятным последствиям.

Непосредственный сброс в верхние слои земли небольших количеств жидких отходов низкой удельной активности осуществляется в Чок-Ривере (Канада) и Саванна-Ривере (США). В этих местах также наблюдается заметное продвижение радиоактивных веществ в направлении близлежащих водных источников.

Таким образом, опыт Ханфорда, Саванна-Ривера и Чок-Ривера, а также экспериментальные исследования, результаты которых приведены на симпозиуме в докладе В. И. Спицына и В. Д. Балужковой (СССР),



Р и с. 2. Цементирование радиоактивных отходов.

подтвердили прогнозы советских ученых, высказанные в 1958 г. на Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии и в 1959 г. на конференции МАГАТЭ в Монако, об опасностях, связанных со сбросом жидких радиоактивных отходов в верхние слои земли.

На симпозиуме было сделано несколько сообщений о лабораторных и полевых исследованиях, связанных с проблемой миграции радиоактивных изотопов и возможностью их попадания в грунтовые воды. В докладе Д. Вайсфлога (ФРГ) показано, что для создания модели потока жидкости в пористой среде с целью изучения скорости движения, а также распространения радиоактивных веществ лабораторных исследований недостаточно ввиду высокой неоднородности природных грунтов, и для правильного представления картины потока жидкости необходимо проведение полевых опытов. Следует заметить, что эти выводы значительно раньше были сделаны советскими авторами. В Токаи (Япония) изучено соотношение между скоростью движения грунтовых вод и скоростью миграции отдельных изотопов, содержащихся в них. Установлено, что Cs^{137} сорбируется почвой значительно сильнее, чем Sr^{90} , а J^{131} практически не сорбируется и перемещается со скоростью движения грунтовых вод. В докладе З. Длоухи (Чехословакия) рассмотрено поведение радиоактивных изотопов при сливании в земляные траншеи жидких отходов в аварийных случаях и показано, что засыпка дна туфами способствует значительно удержанию радиоактивных веществ.

Интерес представляет доклад Л. Бетсле (Бельгия) о создании химических барьеров в водоносных слоях для предотвращения миграции радиоактивных изотопов при случайном загрязнении почв. Особенность метода состоит в том, что на пути движения загрязненного потока производится инъекция реагентов, образующих в результате химических реакций активные сорбционные соединения, которые могут поглощать микропримеси из раствора. В докладе описана методика подобного активирования грунтов последовательной обработкой почвы разбавленной фтористоводородной кислотой, а затем раствором соли сурьмы. Автор показал, что такая обработка почвы позволяет селективно сорбировать стронций. Хотя описанный вариант нельзя считать практически ценным и экономически выгодным, в принципе этот метод заслуживает внимания.

Несколько докладов на симпозиуме было посвящено закачке радиоактивных отходов в глубинные геологические формации. У. Мак-Клейн (США) сообщил результаты опытно-промышленной закачки в горные породы отходов удельной активности $0,1$ кюри/л в смеси с цементом и другими добавками, способствующими перемещению цементной пульпы и более прочному удержанию радиоактивных изотопов в результате сорбции. Нагнетание произошло при давлении $1000-1750$ кг/см² на глубину 300 м порциями по $300-400$ м³ в течение $10-20$ ч. В этих условиях сланец расслаивается и в образовавшихся порах застывает цементная пульпа. Операции проводятся несколько раз в год. Р. Левек (Франция) описал метод высокого давления для нагнетания радиоактивных отходов в трещиноватые граниты. Однако эффективность этого способа оказалась весьма низкой: только несколько процентов объема горной породы удавалось заполнить цементной пульпой.

Большой интерес на симпозиуме вызвали доклады советских ученых, посвященные научным предпосылкам использования глубинных формаций земли для

захоронения жидких радиоактивных отходов (авторы В. И. Спицын и В. Д. Балукова) и результатам эксплуатации опытно-промышленного полигона по удалению жидких радиоактивных отходов в подземные горизонты (авторы В. Ф. Багрецов, М. К. Пименов и др.). Хотя геологические исследования, связанные с удалением различных промышленных отходов в глубинные слои земли, проводятся давно, практический интерес к таким работам возник только после первых сообщений об успешной реализации этого метода в СССР. Во Франции проводится систематическое изучение геологических структур, которые могли бы представлять интерес для глубокого захоронения жидких радиоактивных отходов, сделаны некоторые теоретические расчеты на основании имеющегося опыта удаления отходов нефтяной промышленности, однако в докладе А. Барбро не приведено никаких экспериментальных результатов. А. Клебш сообщил о результатах геологического исследования различных районов Америки с целью определения формаций, пригодных для подземного удаления жидких радиоактивных отходов, и указал два примера по удалению этим методом отходов урановой промышленности и растворов, содержащих тритий. Так, например, на заводе в Айдахо в 1959 г. на глубину 200 м в водоносный горизонт были закачаны отходы, содержащие 8 кюри трития, а в 1961—1965 гг. — от 58 до 1700 кюри/год. Вскоре после закачивания тритий был обнаружен на расстоянии $6-7$ км от места нагнетания. Результаты показывают, что эти опыты по существу соответствуют разбавлению отходов грунтовой водой, а не созданию постоянного подземного хранилища отходов. Небольшое место в докладе А. Клебша было уделено подземному захоронению газообразных отходов с целью их выдержки для распада радиоактивных газов или поглощения этих газов грунтом. На заводе в Айдахо проектируется хранилище для газа в водоносном пласте толщиной 12 м и на глубине от 30 до 150 м, защищенном сверху слоем глины или сланца.

Представители атомных центров Швейцарии, Испании, Мексики, Индии и других стран сообщили о результатах геологических исследований районов, предлагаемых для размещения хранилищ радиоактивных отходов преимущественно в твердой форме. Приводимые в этих докладах расчеты и рекомендации представляют некоторый общий интерес.

В докладах, представленных на симпозиум, при обосновании выбора метода захоронения отходов различной удельной активности наряду с обеспечением радиационной безопасности окружающей среды очень большое внимание уделяется экономике и приводятся данные по экономической оценке обсуждаемых методов захоронения. Анализ этих данных показывает, что наиболее дешевым и обеспечивающим надежность захоронения жидких радиоактивных отходов методом является закачка в глубинные геологические формации.

В заключение следует отметить, что проведенный симпозиум еще раз подтвердил правильность позиции советских ученых о недопустимости практикуемого некоторыми странами бесконтрольного сброса радиоактивных отходов в окружающую среду и показал, что основным критерием при выборе методов захоронения твердых и жидких радиоактивных отходов должно быть обеспечение радиационной безопасности окружающей среды в течение всего периода хранения.

ВИКТ. И. СПИЦЫН, Н. А. РАКОВ,
В. Ф. БАГРЕЦОВ