

УДК 621.039.716.006.5

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

*Ефанкин В.Г., Кащеев В.А., Полуэктов П.П., Поляков А.С.
(ВНИИНМ им. А.А. Бочвара)*

Самозахоронение радиоактивных отходов высокого уровня активности, подразумевающее погружение контейнеров (капсул) в глубинные геологические формации в результате проплавления горных пород за счет тепловыделения самих отходов, является одним из возможных методов удаления из сферы обитания человека [1, 2]. Теоретической проработке указанного метода посвящено несколько работ, в которых описана математическая модель самозахоронения капсул с высокоактивными отходами и определена характерная скорость погружения капсул в породу [3, 4]. Тем не менее процесс проплавления реальной горной породы содержит особенности, описание которых на основе модельных представлений затруднительно. В частности, существенное влияние на самозахоронение оказывают неоднородности структуры горной породы (тугоплавкие включения или заполненные газом поры), регулирующие теплообмен между капсулой и окружающей средой и в результате способные изменить не только скорость ее погружения, но и траекторию в породе.

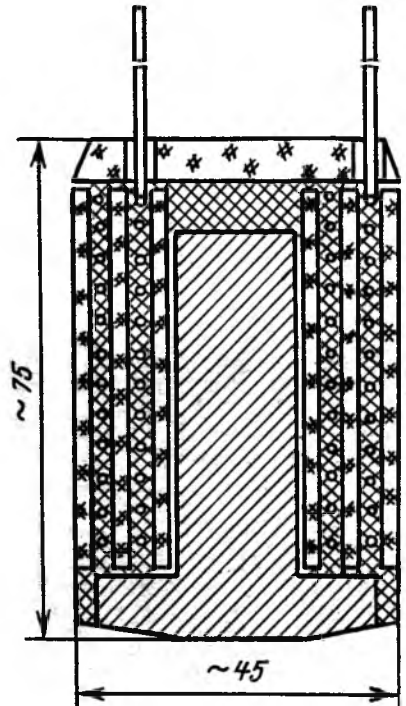
Очевидно, решающим доказательством осуществимости и целесообразности промышленной реализации данного способа захоронения мог бы явиться полномасштабный эксперимент с капсулой, содержащей в качестве имитатора реальных отходов изотопы со «средним» временем жизни (например, ^{60}Co с периодом полураспада 5,27 года или ^{137}Cs — 30,2 года) в количестве, достаточном для обеспечения необходимого тепловыделения [1]. Подобный эксперимент требует значительных материальных и временных затрат на подготовку. Вместе с тем некоторые научные и технические вопросы можно решить с помощью модельных лабораторных экспериментов.

Целью настоящей работы являлась оценка в условиях лабораторного эксперимента необходимой температуры нагрева капсулы для проплавления различных материалов, имитирующих горные породы, удельной тепловой мощности капсулы, необходимой для протекания процесса и определения скорости погружения капсулы.

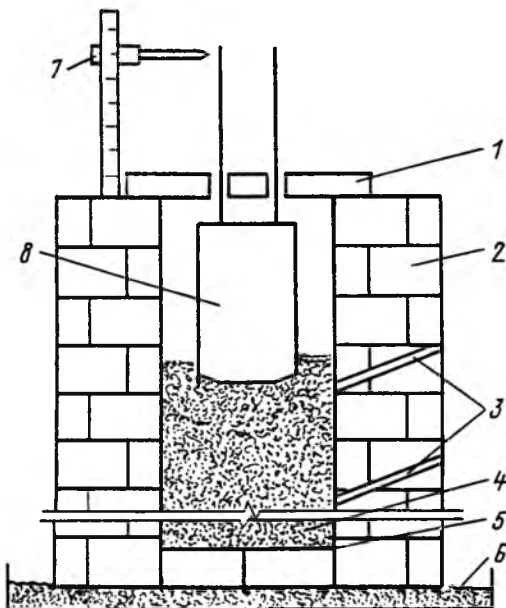
В качестве модели саморазогревающегося контейнера с отходами использовали электрически нагреваемую капсулу (рис. 1, 2). Нагревательный элемент капсулы (см. рис. 2) состоял из двух concentricки расположенных спиралей, навитых никромовой проволокой диаметром 2 мм. Внешнюю, внутреннюю и межслойную изоляцию спиралей выполняли с помощью керамических изоляторов, предварительно отформованных из шамотной глины и обожженных при 900—950 °С. Витки спиралей изолировали один от другого смесью шамотной глины с оксидом алюминия. После сборки и обжига нагревателя в центральный канал вставляли стальной сердечник грибовидной формы для увеличения теплопроводности всей конструкции капсулы. Диаметр капсулы-нагревателя после окончательной сборки и обжига 45, высота 75 мм, электропитание — от батареи из двух трансформаторов типа ОСМ1-25 УЗ со смешанным параллельно-последова-



Р и с. 1. Внешний вид электрически нагреваемой капсулы, имитирующей контейнер с высокоактивными отходами в лабораторном эксперименте



Р и с. 2. Конструкция электрически нагреваемой капсулы



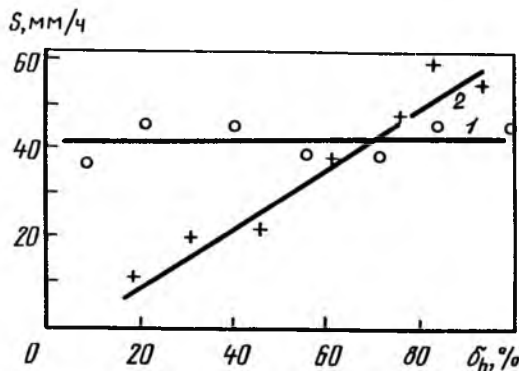
Р и с. 3. Схема экспериментального стенда для анализа динамики погружения капсулы в различные породы

Исследуемые материалы определяли в теплоизолирующем блоке, представленном в разрезе на рис. 3. Корпус блока 2 был сложен из легкого шамотного кирпича на глинистом растворе. В центре блока располагалась плавильная камера 5 в виде цилиндрического колодца диаметром, приблизительно в 2 раза превышающим диаметр капсулы. Камера закрывалась крышкой 1 с отверстиями для свободного перемещения теплопроводящих шин. Кроме того, в корпусе блока были выполнены каналы 3 для установки термпар в зоне плавления 5. Весь блок был установлен в поддоне 6 на песчаной подушке. Скорость погружения оценивали по вертикальному перемещению верхних концов жестких токоподводящих шин с помощью измерительной линейки 7. Исследуемые образцы породы 4 загружали в плавильную камеру 5, на поверхность образцов свободно устанавливали погружающуюся капсулу 8 без дополнительных креплений и направляющих. Объем исследуемых образцов составлял от 100 до 400 см³.

В качестве образцов для исследования в рассматриваемой серии опытов использовали поликристаллическую соль NaCl ($t_{пл} \sim 800^\circ\text{C}$, размер гранул 0,2—0,6 мм) и крошку силикатного стекла ($t_{пл} \geq 900^\circ\text{C}$, размер гранул 0,2—6 мм). Выбор указанных объектов был обусловлен, во-первых, тем, что кристаллы чистой соли имеют фиксированную температуру плавления, а гранулы стекла размягчаются и переходят в текучее состояние постепенно по мере повышения температуры сверх 900°C , во-вторых, рабочая температура описанной лабораторной установки соответствует диапазону плавления выбранных материалов.



Р и с. 5. Застывший скол проплавленного силикатного стекла



Р и с. 4. Экспериментальная зависимость скорости погружения капсулы S от относительной глубины погружения для поликристаллической соли (1) и силикатного стекла (2)

тельным включением обмоток. Сетевое напряжение на батарею трансформаторов подавали от регулируемого автотрансформатора типа ОРН-250-5, что позволяло изменять мощность нагревательного элемента от 0 до 5,5 кВт, при этом можно было достигать рабочей температуры поверхности нагревателя $950\text{--}1000^\circ\text{C}$ в условиях длительного нагрева.

Скорость погружения капсулы при проплавлении исследуемых материалов определяли в теплоизолирующем блоке, представленном в разрезе на рис. 3. Корпус блока 2 был сложен из легкого шамотного кирпича на глинистом растворе. В центре блока располагалась плавильная камера 5 в виде цилиндрического колодца диаметром, приблизительно в 2 раза превышающим диаметр капсулы. Камера закрывалась крышкой 1 с отверстиями для свободного перемещения теплопроводящих шин. Кроме того, в корпусе блока были выполнены каналы 3 для установки термпар в зоне плавления 5. Весь блок был установлен в поддоне 6 на песчаной подушке. Скорость погружения оценивали по вертикальному перемещению верхних концов жестких токоподводящих шин с помощью измерительной линейки 7. Исследуемые образцы породы 4 загружали в плавильную камеру 5, на поверхность образцов свободно устанавливали погружающуюся капсулу 8 без дополнительных креплений и направляющих. Объем исследуемых образцов составлял от 100 до 400 см³.

В качестве образцов для исследования в рассматриваемой серии опытов использовали поликристаллическую соль NaCl ($t_{пл} \sim 800^\circ\text{C}$, размер гранул 0,2—0,6 мм) и крошку силикатного стекла ($t_{пл} \geq 900^\circ\text{C}$, размер гранул 0,2—6 мм). Выбор указанных объектов был обусловлен, во-первых, тем, что кристаллы чистой соли имеют фиксированную температуру плавления, а гранулы стекла размягчаются и переходят в текучее состояние постепенно по мере повышения температуры сверх 900°C , во-вторых, рабочая температура описанной лабораторной установки соответствует диапазону плавления выбранных материалов.

Как следует из приведенных на рис. 4 зависимостей, характер погружения и скорость перемещения капсулы веществ с фиксированной температурой плавления существенно отличаются от таковых для веществ с плавно меняющейся вязкостью.

Интересен застывший скол проплавленного образца стекла, полученного в одном из опытов и представленного на рис. 5. На сколе образца в области, граничащей с нижней частью капсулы, хорошо видна слоистая структура стекломассы с различной степенью прогрева, а также линия тока, соответствующая перетеканию этих слоев из области под капсулой к боковым стенкам плавильной камеры. Также обращает на себя внимание образование в наиболее прогретой области расплава газовых пузырьков и их миграция по линиям тока. На основании анализа скола можно

сделать вывод о существенно неравномерном прогреве материала в зоне плавления, что приводит к неравномерному распределению плотности и вязкости расплава на участке движения капсулы. Поэтому можно ожидать, что теоретические зависимости, полученные на основе анализа математической модели процесса, могут лишь качественно описывать реальный процесс погружения капсулы с отходами в горную породу. Также необходимо тщательно исследовать влияние микровключений на скорость погружения капсулы. Этот фактор может служить еще одним аргументом необходимости проведения полномасштабного эксперимента для проверки осуществимости данного метода захоронения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашеев В.А., Полуэктов П.П., Поляков А.С. Радиоактивные отходы — в недра. — Наука в России, 1992, № 4, с. 22—26.
2. Byalko A., Khavroshkin O. Method of disposal of high level nuclear waste by deep sinking. — In: Proc. RECORD'91, Sendai, 1991, p. 486—490.
3. Emerman S., Turcotte D. Stokes's problem with melting. — Intern. J. Heat and Mass Transfer, 1983, v. 26, № 11, p. 1625—1630.
4. Кашеев В.А., Никифоров А.С., Полуэктов П.П., Поляков А.С. К теории самозахоронения высокоактивных отходов. — Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 3, с. 215—221.

Поступило в Редакцию 23.11.93

Рефераты публикуемых статей

УДК 621.039.526:621.039.58

Рыжанский В.А., Иванов А.Г., Жуков В.В. Методика оценки взрывостойкости и несущей способности корпуса быстрого реактора при запроектной аварии. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 2, с. 87—93.

Приведены результаты экспериментального исследования реакции моделей 1:10 быстрого реактора БН-800 на внутреннее взрывное нагружение, имитирующее запроектную аварию. Оценены масса зарядов тнт, взрывы которых способны разрушить корпус в определенных зонах. Предложена методика, позволяющая на основе результатов модельных взрывных испытаний оценить запас несущей способности корпуса реактора в условиях запроектной аварии. Рис. 5, табл. 3, список лит. 9 назв.

УДК 621.184.25:621.181.192

Бараненко В.И., Киров В.С., Кравченко В.П., Коровкин В.А., Фридман Н.А. Колебания температуры в системе регенерации высокого давления АЭС с ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 2, с. 93—98.

Рассмотрена статистика изменения температуры питательной воды на 13 блоках АЭС за период от пуска до повреждения парогенераторов или до настоящего времени. Указывается на связь изменения температуры питательной воды с повреждением парогенераторов. При отключении (включении) подогревателей перепад температуры между трубками теплопередающей поверхности в области центральной перемычки может измениться до 1,2 °С. Это вызывает пульсации термических напряжений до 2,15 МПа, которые не могут привести к прочностным разрушениям, но колебания температуры могут трансформироваться в напряжения, превышающие предел прочности в вершине трещины, и приводить к ее росту. Табл. 2, список лит. 10 назв.

УДК 669.017.16:539.12.04.001

Шевчук Ю.А. Феноменологическое описание стабильности бинарных сплавов под облучением. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 2, с. 98—103.

Дано феноменологическое описание поведения бинарного сплава под облучением. Учтено влияние рекомбинации, диффузии и аннигиляции точечных дефектов на стоках, а также эффекты радиационного перемешивания компонентов сплава и снятия внутренних напряжений избыточными вакансиями. Сформулированы условия потери стабильности сплава под облучением. Показано, что поведение сплава может быть описано в рамках теории спиновального распада Кана—Хачатуряна, но с параметрами, зависимыми от условий облучения. Список лит. 14 назв.

УДК 669.017.16:539.12.04.001

Шевчук Ю.А. Феноменологическое описание стабильности тройного сплава под облучением. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 2, с. 104—108.

Дана схема феноменологического описания потери стабильности под облучением трехкомпонентного сплава с учетом влияния радиационного перемешивания, диффузии точечных дефектов, их рекомбинации и аннигиляции на стоках. Показано, что перераспределение примесей под облучением описывается системой двух дифференциальных уравнений в частных производных, как и процесс термически активируемой взаимной диффузии, но с перенормированными коэффициентами. Стабильность сплава теряется при появлении хотя бы одного отрицательного собственного значения матрицы перенормированных коэффициентов взаимной диффузии. Список лит. 17 назв.