

регистрируемых электронов также моноэнергичен и зададимся некоторой толщиной счетчика L_1 . При этом могут возникнуть два случая, когда энергия регистрируемых электронов $E_\beta > E_1(\varphi_{гр})$ либо $E_\beta < E_1(\varphi_{гр})$. В первом случае следует увеличивать L_1 до значений, несколько превышающих пробег комптоновских электронов. При этом спектр регистрируемых электронов будет смещен вправо, поэтому дискриминацией можно отсечь импульсы от γ -квантов. Если же $E_1(\varphi_{гр}) > E_\beta$, то из расчета следует, что эффективность снижения L_1 резко уменьшается, начиная с некоторого значения. Последнее видно из сравнения спектров рис. 2 и 3 и положения пиков, обусловленных электронами различных энергий (полученных также при использовании результатов работы [4]). Сначала при снижении L_1 спектр приобретает форму, близкую к ступенчатой, а линии энергии, выделяемой регистрируемыми электронами, группируются, что в принципе позволяет «вырезать» из амплитудного спектра участки, содержащие несколько линий, и повысить эффективность регистрации электронов. В дальнейшем, когда выделение энергии электронами превышает значение, соответствующее краю комптоновского спектра (см. рис. 3 для $\varepsilon = 2$), эффективность возрастает незначительно.

В заключение отметим, что изменение формы кривых зависимостей комптоновских электронов от энергии γ -квантов, наблюдавшееся в работе [6], качественно соответствует спектрам рис. 2 и 3.

Следует ожидать, что при меньших толщинах счетчика совпадение будет лучшим, так как допущение о прямолинейности траектории электронов становится менее грубым.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору С. М. Рывкину за внимание к работе.

Поступила в Редакцию 3/VII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Иванов. Дозиметрия ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1964, стр. 169.
2. F. Walter, R. Boshart. Nucl. Instrum. Methods, 42, 1 (1966).
3. J. McKenzie, G. Ewan. IRE Trans. Nucl. Ser. 8, No. 1, 50 (1961); в сб. «Полупроводниковые счетчики излучений». М., Госатомиздат, 1962, стр. 88.
4. В. Г. Равин. «Физика твердого тела», 7, 3430 (1965).
5. W. Weis, E. Whatley. Nucleonics, 20, 147 (1962).
6. Д. Ж. Дирли, Д. Нортроп. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М., «Мир», 1966, стр. 274.

Опыт захоронения жидких радиоактивных отходов в глубинные геологические формации

Ф. П. ЮДИН, М. К. ПИМЕНОВ, А. И. НАЗАРОВ, С. И. ЗАХАРОВ,
С. В. МЕТАЛЬНИКОВ, В. М. СЕДОВ

УДК 621.039.714

Основные исследования в области захоронения радиоактивных отходов направлены на разработку технически простого и экономичного способа удаления и захоронения отходов [1—5].

Один из перспективных способов — захоронение жидких радиоактивных отходов в глубинные геологические формации. В Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР) выполнены работы по изучению возможности и условий захоронения отходов в глубинные слои земли. Некоторые результаты исследований изложены в работах [6—8].

В 1965 г. на основе имеющихся данных по исследованию гидрогеологии района было признано возможным и целесообразным приступить к строительству опытной установки в НИИАР по удалению радиоактивных отходов в недра

в целях накопления практических данных для строительства промышленной установки. Проектом опытной установки предусматривалось максимальное использование сооружений существующей очистной станции по дезактивации отходов упариванием и существующих геолого-разведочных скважин.

Результаты геолого-гидрогеологических исследований

Изучаемый район в региональном плане относится к Русской платформе. Для детального изучения геологического разреза и водоносных горизонтов были пробурены три скважины. Этими скважинами вскрыта толща мезокайнозойских и палеозойских осадочных отложений

общей мощностью 2270—2300 м, залегающих на кристаллическом фундаменте архейского возраста.

Разрез палеозоя представлен девонской, каменноугольной и пермской системами общей мощностью 2100 м, сложенными главным образом карбонатными породами, среди которых выделяются терригенные осадки (глина, аргиллиты, алевролиты, песчаники, пески). Мезозойские отложения представлены глинистыми породами триаса и юры общей мощностью 100—110 м. Верхний комплекс — аллювиальные отложения четвертичной системы, представленные песчано-глинистыми отложениями мощностью до 60 м.

Подземные воды в разрезе имеют четкую вертикальную гидродинамическую зональность. Верхняя зона активного водообмена охватывает породы четвертичного и частично юрского возраста. Воды пресные, гидрокарбонатного состава. Питание водоносных горизонтов этой зоны происходит путем местной инфильтрации, а а дренирование — местной гидрографической сетью.

Средняя зона затрудненного водообмена охватывает отложения перми и верхнего карбона. Минерализация составляет 45 г/л. Воды сульфатные, хлоридно-натриевого состава. Непосредственное дренирование этих вод в пределах рассматриваемого района не установлено. По литературным данным, разгрузка их имеется в районе тектонического разлома, в 150—170 км от предприятия.

Зона застойных вод приурочена к породам среднего и нижнего карбона и девона, минерализация достигает 280 г/л, воды хлоридно-кальциевого типа.

Нефть, газ и другие полезные ископаемые в радиусе до 50 км отсутствуют.

Ближайший водозабор подземных вод находится в 4,0 км, второй — в 7,0 км от разведваемого участка, оба водозабора заложены на пресные воды четвертичных отложений.

На основе проведенных геологических и геофизических исследований в разрезе палеозоя выделены шесть проницаемых зон, которые детально изучаются с целью определения их параметров и возможности использования для захоронения отходов. К настоящему времени исследованы три зоны, считая снизу.

Первая и вторая зоны приурочены к отложениям девона и турнейского яруса нижнего карбона. В результате опытов путем откачки и нагнетания воды получены низкие гидродинамические параметры обеих зон, поэтому обе зоны признаны непригодными для удаления

в них радиоактивных отходов и из дальнейших исследований исключены.

Третья зона приурочена к терригенным отложениям угленосного горизонта нижнего карбона (1432—1508 м), представлена переслаиванием кварцевых мелко- и среднезернистых песчаников с тонко- и грубозернистыми алевролитами, глинистыми аргиллитоподобными глинами. Карбонатность пород практически отсутствует, но отмечается большая углефикация и пиритизация. Пески кварцевые, разной окатанности, крупностью от 0,1—0,15 до 0,4 мм, имеются отдельные включения крупностью до 2,0 мм. Цемент по структуре базальный, поровый и контактный.

Пластовые воды минерализованные, сухой остаток — 245 г/л, содержание основных компонентов: хлор — 134 г/л, натрий и калий — 66,7 г/л, кальций — 11,4 г/л; pH — 6,6, плотность — 1,15 г/см³.

В процессе освоения скважины, вскрытой на эту зону, был проведен гидроразрыв, после чего на скважине осуществлены откачка пластовых вод и нагнетание пресной воды, полученной из четвертичных песков.

Откачкой воды получен расход 14 л/сек; при понижении уровня на 70 м удельный расход составил 0,17 л/сек. При нагнетании с расходом 8,0 л/сек давление на устье скважины составило 23,6 атм, из них 17,6 атм следует отнести за счет разности удельных весов пластовых и закачиваемых вод и 6,0 атм за счет повышения пластового давления при нагнетании воды. В этом случае удельный расход составил 0,13 л/сек/м.

Третья проницаемая зона, по-видимому, имеет затрудненную гидравлическую связь с вышележащим окско-серпуховским и башкирским водоносным комплексом, кровля которого залегает на глубине 1120 м. Указанный водоносный комплекс перекрыт глинистыми породами верейского горизонта мощностью до 40 м, который регионально выдержан на всей Русской платформе и служит надежным водоупором. Кроме того, воды застойного и замедленного водообмена перекрываются выдержанной толщей татарских и юрских глин общей мощностью 200—210 м. Распространение этих глин отмечено в радиусе 60—100 км от исследуемого участка.

Общие геолого-гидрогеологические условия, режим подземных вод и наличие мощных глинистых водоупоров благоприятны для подземного захоронения отходов в III проницаемую зону.

Состав радиоактивных отходов и общие требования к подготовке их для захоронения

В процессе опытных работ в скважину Р-3 подавались дезактивационные и прачечные воды, имеющие сложный химический состав, который во многом определяет взаимодействие отходов с породами пласта и пластовыми водами и условия коагуляции. Исследования по подготовке отходов к захоронению рассмотрены в работе [9].

Средний химический состав дезактивационных вод следующий (мг/л):

Железо	2—15
Натрий	800—3000
Фосфаты	2—15
Оксалаты	10—15
Кремниевая кислота	25—40
Хлориды	20—50
Нитраты	750—3000
Сульфаты	150—500
Мыло	50—150
ОП-7	50—150
Керосиновый контакт + «Новость»	200—1000

Дезактивационные воды имеют: $\text{pH} = 6,0 \div 11,0$, жесткость 30—120 мг/л, окисляемость 600—1500 мг $\text{O}_2/\text{л}$, плотность 1,0—1,01 г/см³.

Удельная активность 10^{-6} — 10^{-5} кюри/л и обусловлена в основном продуктами деления урана. Содержание радиоактивных изотопов (%): $\text{Cs}^{137} = 11,0 \div 33,0$; Sr^{90} , $\text{Sr}^{90} + \text{Ba}^{140} = 16,0 \div 30,0$; редкоземельные элементы + Y^{90} , $\text{Y}^{91} = 4,0 \div 22,0$; $\text{Zr}^{95} + \text{Nb}^{95} = 6,0 \div 7,0$; $\text{Ru}^{103} + \text{Ru}^{106} + \text{Rh}^{103} + \text{Rh}^{106} = 3,0 \div 13,0$; $\text{J}^{131} = 0,3 \div 31,0$.

К отходам, поступающим в водоносный поглощающий горизонт, предъявляются определенные требования. Они должны быть совместимы с пластовыми условиями и обладать достаточной стабильностью. Кроме того, взвешенные вещества, содержащиеся в отходах, не должны вызывать коагуляции фильтровой зоны скважин, поэтому дисперсность частиц должна быть меньше размеров пор в породах пласта.

Схема опытной установки подземного захоронения отходов

Общая схема опытной установки показана на рисунке.

Отходы, предварительно обработанные на имеющихся сооружениях, из сборного резервуара объемом 200 м³ насосами, расположенными в специальном здании насосной станции, по напорному трубопроводу (диаметр 108 мм, длина 980 м) подаются в нагнетательную сква-

жину и по ней поступают в поглощающий водоносный горизонт.

В качестве нагнетательной используется разведочная скважина Р-3 глубиной 1550 м, вскрывающая III проницаемую зону. Конструкция скважины: кондуктор из обсадных труб диаметром 300 мм спущен на глубину 282,3 м, эксплуатационная колонна диаметром 150 мм — на глубину 1411,1 м, фильтровая колонна из труб из нержавеющей стали диаметром 133 × 6 мм установлена в интервале 1397,3—1547,5 м. Фильтровая колонна в интервале 1432,1—1504,5 м общей длиной 72,4 м имеет перфорацию, скважность которой 11%. Затрубное пространство кондуктора и эксплуатационной колонны зацементировано на всю глубину. Скважина оборудована лифтовой колонной из труб из нержавеющей стали диаметром 133 × 6 мм, спущенной на глубину 350 м.

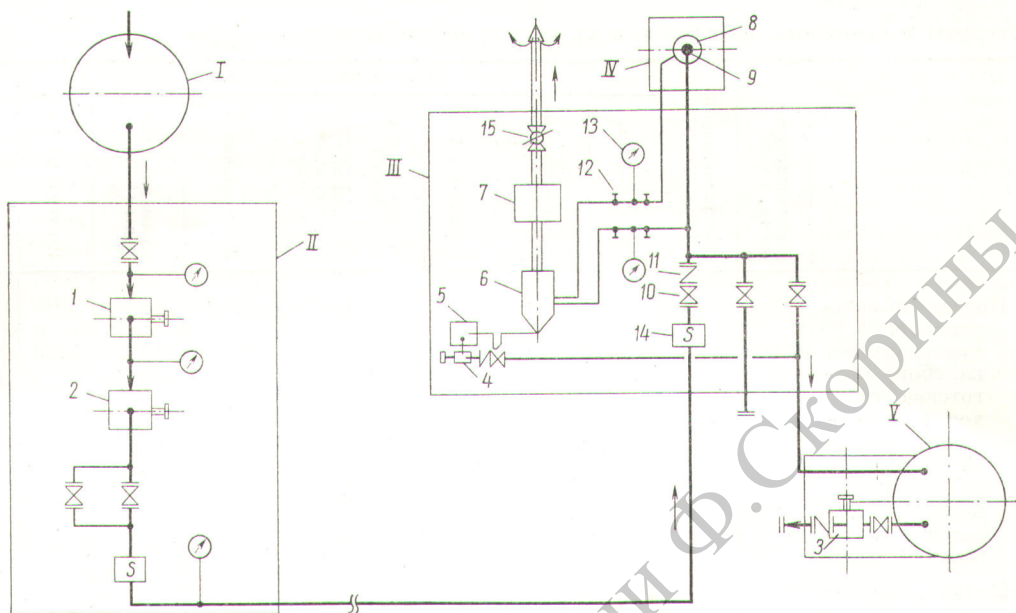
На устье скважины устроен оголовок, где осуществлено соединение эксплуатационной колонны с лифтовой и подающим трубопроводом, установлены задвижки, обратные клапаны, расходомер и манометры. Предусмотрен сброс газа из пространства между лифтовой и технической колоннами в случае газообразования в пласте. Перед выпуском в атмосферу газ проходит мультициклон и фильтр. У оголовка скважины устроен павильон размером в плане 6 × 6 м, в подземной части павильона расположена запорная арматура, а в надземной — размещены электроприводы задвижек, контрольные приборы и пр.

В процессе опытной эксплуатации предусмотрена возможность обратной промывки скважины, для чего на расстоянии 50 м от нее устроен подземный резервуар объемом 250 м³. В этом резервуаре предусматривается сбор дренажных и обмывочных вод из оголовка скважины, а также хранение соленых вод для погашения в случае необходимости избыточного давления на устье скважины. Воду от промывки скважин предполагается закачивать обратно в скважину, с этой целью у резервуара устанавливается насос. Этим насосом подается и соленая вода для снятия избыточного давления.

В качестве контрольных скважин для наблюдения за распространением отходов по площади пласта и состоянием вышележащих водоносных горизонтов использовались следующие разведочные скважины: Р-1, Н-1, Р-2, Р-4, расположенные от скважины Р-3 на расстоянии 100, 500, 1300 и 550 м соответственно. Скважины Р-1, Н-1 и Р-2 вскрыты на III про-

Схема опытной установки:

I — приемный резервуар; II — насосная станция; III — узел управления у скважины Р-3; IV — оголовок скважины; V — резервуар обмывочных, дренажных и промывочных вод с насосной установкой; 1, 2 — насосы, подающие отходы в скважину; 3 — насос для перекачки деконтата из резервуара сбросных вод в скважину; 4 — насос для перекачки дренажных вод; 5 — дренажный приемник; 6 — циклон-расширитель для сдувочного газа из скважины; 7 — фильтр для очистки газа; 8 — обсадная колонна; 9 — лифтовая колонна; 10 — задвижка; 11 — обратный клапан; 12 — вентиль; 13 — манометр; 14 — расходомер; 15 — газовый счетчик; — трубопровод для отходов; — трубопровод сдувочных газов.



нищаемую зону, а Р-4 вскрыта на вышележащую IV проницаемую зону в интервале 1130—1309 м.

Показатели работы установки

Опытная установка была пущена в эксплуатацию в апреле 1966 г.

Нагнетание отходов в скважину проводилось с расходом 10—11 м³/ч или в среднем 250 м³/сутки. Так как фактический приток отходов в процессе опытных работ составлял 100—150 м³/сутки и был меньше, чем подавалось на скважину, установка работала периодически: в течение примерно 30 суток проводилась закачка отходов, после чего следовал перерыв на 10—20 суток. За время перерыва отходы накапливались в запасных емкостях.

Измерения и расчеты показали, что приемистость скважины колебалась в пределах 1,5—2,0 м³/сутки на 1 м избыточного давления и в конце длительного периода эксплуатации установилась равной 1,2 м³/сутки на 1 м.

Всего в 1966 г. было удалено 40 000 м³ дезактивационных вод, содержащих 360 кюри радиоактивных изотопов, что вполне удовлетворяло потребности института.

Если принять равномерное радиальное распределение растворов по пласту и не учитывать фильтрационную неоднородность его, при удалении указанного количества вод радиус распространения равен примерно 50 м. Так как расстояние до ближайшей наблюдательной сква-

жины равно 100 м, в пробах вод, взятых из наблюдательных скважин, пока не обнаружены ни нитраты, ни радиоактивные изотопы. Геофизические измерения в наблюдательных скважинах также не показали каких-либо изменений определенных ранее фоновых показателей и температуры. Здесь следует отметить, что, согласно данным работы [10] по малоактивным отходам, повышение температуры за счет распада радиоактивных веществ с учетом сорбции незначительно. В конкретных условиях опытного участка, когда температура отходов ниже температуры пластовых вод, можно ожидать снижения температуры среды, вмещающей отходы.

Технико-экономическое сравнение

Для оценки перспективности глубинной закачки радиоактивных отходов принципиальное значение имеют экономические показатели этого способа удаления отходов по сравнению с упариванием и хранением кубового остатка в специальных емкостях на поверхности.

Примем, что опытно-промышленная установка подземного захоронения состоит из трех нагнетательных скважин (из них в работе 1 или 2); шести контрольных скважин на эксплуатируемый горизонт, расположенных по двум окружностям с радиусами $R_1 = 300—500$ м, $R_2 = 600—800$ м; трех контрольных скважин на верхние горизонты.

Расходы и стоимость обезвреживания жидких радиоактивных отходов

	Производительность, м ³ /год	Обслуживающий персонал, чел.-год	Прямые расходы, руб.								Общие накладные расходы	Общие расходы (10-12)	Стоимость 1 м ³
			Трудозатраты	Материалы, энергетика, химикаты, охрана труда	Текущий ремонт	Прикладные исследования	Прямые или эксплуатационные накладные расходы	Амортизация	Суммарные расходы (4-9)	Расходы на 1 м ³			
Подземное захоронение: транспортировка, сбор, подготовка отходов к захоронению, закачка отходов в скважины, контроль процесса и окружающей среды	80 000	14	25 950 (7,94)	59 310 (18,1)	36 800 (11,2)	2600 (0,8)	2600 (0,8)	184 000 (56,4)	311 260 (95,3)	3,90	15 400 (4,70)	326 660 (100)	4,10
Метод упаривания: транспортировка, сбор, переработка отходов, хранение концентрата, контроль процесса	80 000	28	51 880 (9,56)	201 610 (37,3)	42 900 (7,9)	520 (0,1)	5190 (0,95)	214 500 (39,5)	516 600 (95,3)	6,45	26 800 (4,7)	543 400 (100)	6,80

Примечание. 1. Средняя удельная активность отходов 10-5 кюри/л.
2. В скобках указаны проценты от общих расходов.

Таким образом, движение контура отходов по пласту контролируется шестью скважинами, а возможная миграция отходов вверх по пластам — тремя скважинами.

Экономическое сравнение двух методов переработки проведено при следующих предпосылках: 1) при годовой закачке 80 000 м³ отходов приняты три нагнетательные скважины и девять контрольных; 2) амортизация нагнетательных скважин и оборудования к ним принята из расчета длительности работы 7,5 лет; 3) амортизация наблюдательных скважин и оборудования принята из расчета 20 лет.

Экономические расчеты сделаны по методике, принятой МАГАТЭ, и результаты их представлены в таблице.

Охрана труда, спецодежда и спецпитание учтены в графе 5. В графе 7 учтены затраты, связанные с усовершенствованием работы оборудования. Затраты на медицинское обслуживание персонала не учтены.

В результате расчетов найдено, что стоимость захоронения 1 м³ жидких отходов в зависимо-

сти от годового сброса снижается следующим образом: при годовом сбросе 150, 250, 400 тыс. м³ стоимость 1 м³ составляет соответственно 2 руб. 80 коп., 2 рубля и 1 руб. 50 коп.

Приведенные расчетные данные позволяют сделать следующие выводы: 1) при годовом объеме сброса 80 тыс. м³ и глубине захоронения около 1400 м удаление глубинным методом дешевле переработки на выпарной установке; 2) при меньших глубинах захоронения и годовых объемах сброса более 200 тыс. м³ стоимость закачки, по-видимому, будет меньше 1 руб/м³; 3) расходы графы 5 в таблице при упаривании составляют 37% общей стоимости переработки 1 м³ отходов и определяются в основном стоимостью пара. При глубинной закачке эти расходы составляют около 18%.

Заключение

1. Проведены исследования в промышленных масштабах по удалению жидких радиоактивных отходов в глубинные формации земной коры.

Установленное оборудование и система контроля обеспечили бесперебойную эксплуатацию установки.

2. Приемистость нагнетательной скважины после пуско-наладочного периода установилась равной $1,2 \text{ м}^3/\text{сутки}$ на 1 м избыточного давления.

3. Исследования показывают, что при благоприятных гидрогеологических условиях удаление радиоактивных вод в глубинные формации можно проводить в промышленных масштабах.

4. На основе технико-экономических расчетов и опыта эксплуатации установлено, что подземное захоронение отходов имеет экономические преимущества по сравнению с методом упаривания.

Поступила в Редакцию 22/IX 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отходы атомной промышленности — природа, использование и удаление. Перев. с англ. М., Госатомиздат, 1963.
2. К. П. Страуб. Малоактивные отходы, хранение, обработка и удаление. М., Атомиздат, 1966.
3. W. George. Chem. Engng, **66**, 151 (1959).
4. Practics in the Treatment of Low- and Intermediate-level Radioactive Wastes. Vienna, IAEA, 1966.
5. Материалы конференции по удалению промышленных радиоактивных отходов. 86 конгресс. Т. 3. Издание Объединенного комитета по атомной энергии конгресса США. 1959.
6. В. И. Спицын и др. Доклад на симпозиуме МАГАТЭ, май — июнь 1967, SM-93/41.
7. В. И. Спицын, В. Д. Балуква. Там же, SM-93/13.
8. С. И. Захаров и др. Там же, SM-93/42.
9. В. И. Спицын, В. Д. Балуква, В. Ф. Багрецов. «Атомная энергия», **24**, 133 (1968).
10. Е. Д. Мальцев и др. «Атомная энергия», **12**, 36 (1962).