

делящихся изотопов плутония $K_{Pu}(B) > 1$ для выгорания 60—100 МВт·сут/кг указывают на возможность самообеспечения делящимися ядрами плутония при рассмотрении топливных циклов в режиме разовой загрузки.

Рассмотренные варианты открытого топливного цикла в режиме разовой загрузки с металлическим топливом при среднем содержании плутония 8% характеризуются низким запасом реактивности на выгорание (0,02), длительным временем работы (3 года) при среднем выгорании 80 МВт·сут/кг с самообеспечением делящимися ядрами плутония как при наличии, так и при отсутствии боковой зоны воспроизводства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crawford D., Porter D., Hayes S. Fuel for sodium cooled fast reactors — US perspective. — J. Nucl. Mater., 2007, v. 371, p. 202—231.
2. Казачковский О.Д., Елисеев В.А., Матвеев В.И., Цибуля А.М. Перспективы использования смешанного оксидного топлива в быстрых реакторах с натриевым охлаждением. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 5, с. 361—366.
3. Voon H. Chang. Technical rationale for metal fuel in fast reactor. — Nucl. Engng Technol., 2007, v. 39, № 3, p. 161—170.
4. Baldev Raj. Status of sodium cooled fast reactors with closed fuel cycle in India. — In: Intern. Congress on Advances in Nuclear Power Plants ICAPP'07. Nice, France, May 15—18, 2007, Pap. № 7593.
5. Vaganov I.V., Gadzhiev G.I., Kosulin N.S., Syuzyov V.N. Results of tests and postirradiation examinations of fuel assemblies UPC-1 with metal U—Pu—Zr fuel. — In: Proc. of the VI Conf. on Reactor Material Science. V. 2. Dimitrovgrad, Russia, 2000, с. 23—25.
6. Маершин А.А., Цыканов В.А., Гаджиев Г.И. и др. Опыт испытания перспективных топливных композиций в БОР-60. — Атомная энергия, 2001, т. 91, вып. 5, с. 385—389.
7. Mitenkova E.F., Novikov N.V., Gadzhiev G.I., Syuzyov V.N. Studies of metal U—Pu—Zr fuel in BOR-60 reactor with focus on its use in high power sodium fast reactors. — In: Proc. PHYSOR'2010, May, 2010, CD-ROM № 700356.
8. Митенков Ф.М., Песков Р.А., Митенкова Е.Ф. Нейтронно-физические характеристики и топливоиспользование в быстром реакторе с натриевым теплоносителем и топливом повышенной плотности на начальном этапе перехода к замкнутому циклу. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 1, с. 8—15.
9. Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. Особенности нейтронно-физических расчетов быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и смешанным оксидным топливом. — Там же, 2010, т. 109, вып. 5, с. 253—262.
10. Митенков Ф.М., Песков Р.А., Митенкова Е.Ф. Оптимизация состава активной зоны быстрого реактора с натриевым теплоносителем и оксидным топливом и совершенствование топливоиспользования при внедрении замкнутого топливного цикла. — Там же, 2008, т. 104, вып. 2, с. 94—99.
11. Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В. Описание модуля VAR-GM генерации расчетных файлов в многовариантных расчетах MCNP—MONTEBURNS—ORIGEN для варьирования геометрических и материальных параметров активной зоны: Препринт № IBRAE-2011-06. ИБРАЭ, 2011. 25 с.

Поступила в Редакцию 2.04.12

УДК 621.039.584+614.87

ФОРМИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Мартьянов В.В., Коренков И.П. (МосНПО «Радон», г. Москва)

Основная цель исследований заключалась в определении возможных сценариев выхода радионуклидов в окружающую среду при выводе из эксплуатации приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов в зависимости от изменения фильтрационных полей и направлений фильтрационного потока во вмещающих породах. Для этого проведены следующие работы:

обобщены исходные геолого-гидрогеологические данные для составления модели формирования фильтрационного потока вблизи групп хранилищ отходов;

рассмотрены сценарии формирования фильтрационных полей для случая вывода хранилищ из эксплуатации;

показано, что восстановление начальных свойств инженерных барьеров при выводе хранилищ из эксплуатации является техногенным воздействием, определенным образом изменяющим гидрогеологическую обстановку на примыкающих участках их размещения.

Технически под выводом из эксплуатации подразумевается восстановление первоначальных свойств инженерных барьеров, например,

повторное омоноличивание хранилища, сооружение дополнительного защитного экрана для предотвращения попадания атмосферных осадков в ближнюю зону, другие защитные мероприятия, обеспечивающие поддержание условий водонепроницаемости согласно критерию $K_1 \ll K_0$ [1—3].

Анализ [1, 4] показал, что в результате сооружения и эксплуатации хранилищ отходов изменились свойства геологического барьера (вмещающих пород) по сравнению с начальными, определенными при изысканиях под площадку в 1960—1961 гг. [2]. Причина отличий связана с техногенными изменениями морфологии площадки при прокладке подъездных путей и коммуникаций, выемкой грунтов из котлованов с образованием насыпей и понижений, асфальтированием и бетонированием значительных площадей, сооружением дренажных канав и прудов-отстойников для отвода поверхностных вод, бурением инженерно-геологических скважин. Зафиксированное постоянное обводнение, значительная мощность водонасыщенных грунтов позволили сделать вывод о том, что за истекший период эксплуатации хранилищ в верхней части геологического барьера сформировался грунтовый водоносный горизонт техногенного происхождения со свойствами, отличными от начальных.

Формирование техногенных фильтрационных полей в значительной степени зависит от природно-климатических факторов, главным из которых является интенсивность выпадения атмосферных осадков. Эти факторы в зависимости от степени техногенного воздействия на площадку размещения отходов могут стимулировать формирование как постоянно действующих (Центральный и Северо-Западный регионы), так и спорадических (временных) водоносных горизонтов (Южный и Поволжский регионы) [5].

Наиболее опасным с точки зрения выхода радионуклидов в окружающую среду является период весеннего снеготаяния [5, 6]. В данный период в течение нескольких дней из снежного покрова в жидкую фазу переводится до 30% среднегодового объема атмосферных осадков. В случае нарушения инженерных барьеров интенсивное насыщение водой при низком поглощении жидкой фазы вмещающими породами может привести к переполнению хранилищ водой.

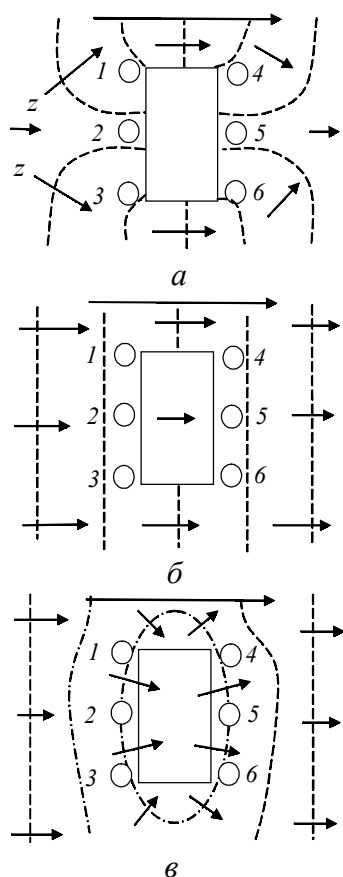
Такие условия создают предпосылки к выходу непосредственно на поверхность и последующему скоротечному переносу жидкой фазы с поверхностным стоком на значительное расстояние. В этом случае хранилища могут стать опасными независимо от региона расположения и среднегодовой интенсивности выпадения атмосферных осадков.

Таким образом, учет гидрогеологических критериев является одним из основных факторов, позволяющих ранжировать радиационно опасные объекты на различных стадиях эксплуатации, а также принимать корректирующие воздействия при выводе из эксплуатации. Гидрогеологические критерии подробно рассмотрены в работе [1]. Поэтому остановимся лишь на отдельных из них, которые используются при определении возможных сценариев выхода радионуклидов в окружающую среду.

В зависимости от характера сформированного техногенного фильтрационного поля на участках размещения хранилищ можно сделать вывод о целостности инженерных барьеров, а значит, предварительно определить хранилища, на участках которых необходимо провести необходимые корректирующие действия. Вывод о целостности инженерных барьеров основан на сравнении коэффициентов фильтрации вмещающих пород K_0 и инженерного барьера K_1 , а также характера изменения уровня грунтовых вод H_1 — H_6 в отдельных сегментах ближней зоны. На рис. 1 приведены фильтрационные поля участков размещения хранилищ с разной степенью деградации, в таблице — гидродинамические признаки (критерии) сохранения и разрушения хранилища, приведенные в работе [1].

Гидродинамические критерии сохранения и разрушения хранилища радиоактивных отходов

Фильтрационные характеристики	Уровень грунтовых вод в наблюдательных скважинах, м (см. рис. 1)	Состояние хранилища
$K_1 \ll K_0$	$H_1 < H_2 > H_3, H_4 > H_5 < H_6,$ $H_1 > H_4, H_3 > H_6$	Изолирующие свойства сохранены
$K_1 = K_0$	$H_1 = H_2 = H_3, H_4 = H_5 = H_6,$ $H_1 > H_4, H_3 > H_6$	Разрушено
$K_1 \gg K_0$	$H_1 = H_2 = H_3, H_4 = H_5 = H_6,$ $H_1 = H_4, H_3 = H_6$	Изолирующие свойства утрачены



Р и с. 1. Филтративные поля участков размещения хранилищ для условий сохранения (а), разрушения (б) и утраты изолирующих свойств (в): ○ 2 — скважина и ее номер; → — основное направление филтративного потока; □ — хранилище; — — — — — изолинии уровней и направление потока грунтовых вод

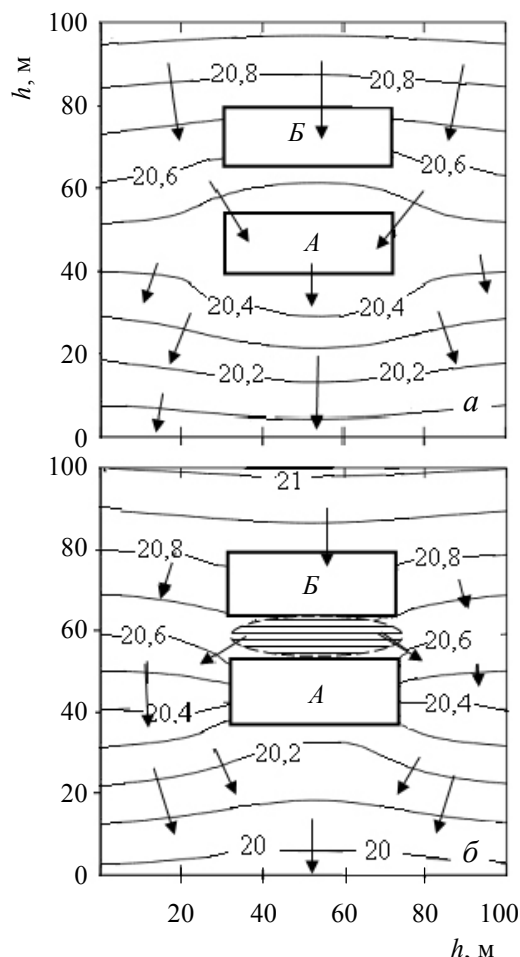
При формировании сценария а филтративный поток деформируется, образуя гидродинамический подпор во фронтальной части, и огибает хранилище (условие $K_1 \ll K_0$), сценария б — не претерпевает существенных изменений (условие $K_1 = K_0$), сценария в — формирует застойную структуру с равным уровнем грунтовых вод в области размещения хранилища (условие $K_1 \gg K_0$). Очевидно, при состоянии хранилищ, соответствующем критериям $K_1 = K_0$ и $K_1 \gg K_0$, необходимо принимать решения для их вывода из эксплуатации. В обоих случаях они являются источниками поступления радионуклидов в окружающую среду.

Рассмотрим характеристики изменения филтративных полей в ближней зоне при восстановлении защитных свойств, а также определим, каким образом эти изменения скажутся на гидрогеологической обстановке в ближней зоне соседних хранилищ. Для этого сформулируем два сценария формирования филтративных

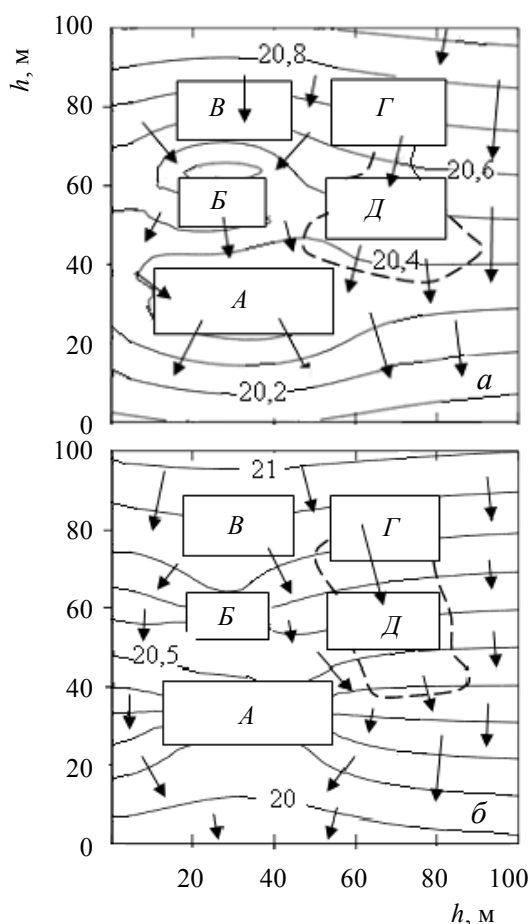
полей на примере находящихся рядом хранилищ (рис. 2, 3).

Сценарий 1. Начальные условия принимаем, исходя из того, что на момент вывода из эксплуатации инженерные барьеры хранилища А обладали филтративными свойствами, соответствующими критерию $K_1 = K_0$, хранилища Б — критерию $K_1 \gg K_0$. Для моделирования и построения филтративных полей использовали методические подходы [1]. Особенностью являлось лишь использование математического редактора MathCad 14, а не Surfer 8 по сценарию 1 для формулирования модели и построения филтративных полей. Построение филтративных полей для сценария 2 базировалось на фактических данных исследований [5, 6].

На рис. 2, а показано начальное поле филтративного потока на участке размещения



Р и с. 2. Филтративные поля на участке размещения хранилищ радиоактивных отходов для сценария $K_1 = K_0$, $K_1 \gg K_0$ (а), $K_1 \ll K_0$ (б): □ — хранилище; — — — — — изолинии уровней воды с относительными отметками и направление потока грунтовых вод; — — — — — область создания гидродинамического подпора грунтовых вод



Р и с. 3. Фильтрационные поля на участке размещения хранилищ радиоактивных отходов на начальный период (а) и период после вывода хранилищ А и Б из эксплуатации (б): □ — хранилище; $\times$ — изолинии уровня и направление потока грунтовых вод; — контур формирования вод с повышенным показателем рН

хранилищ А и Б, удовлетворяющее перечисленным критериям, на рис. 2, б — фильтрационное поле, сформировавшееся через 1500 сут после проведения корректирующих защитных мероприятий на хранилище А (критерий $K_1 \ll K_0$).

Из полученных результатов следует, что перед проведением корректирующих мероприятий (см. рис. 1, а) фильтрационный поток в пределах ближней зоны хранилища Б не претерпевал существенных изменений, деформируясь только в зоне влияния хранилища А, полностью утратившего защитные свойства [1]. При завершении корректирующих мероприятий сформировавшийся фильтрационный поток деформируется, огибая тело хранилища А, являющееся для потока водонепроницаемым барьером (см. рис. 2, б). Во фронтальной части хранилища А и соответственно в тыловой хранилища В создается гидродинамический подпор [1], который повышает уровень грунтовых вод на дан-

ном участке, создавая вероятность выхода в окружающую среду жидкой фазы по сценарию «перелив» [2—6]. В частности, если относительная отметка верхнего перекрытия хранилища Б соответствует $Z_0 = 21,2$ м (см. рис. 2), отметка сформированного подпора уровня грунтовых вод $Z_1 = 20,8$ м, подъем уровня грунтовых вод в весенний период превышает $\Delta H = 0,5$ м, то сценарий «перелив» становится реальностью ($20,8 + 0,5 > 21,2$ м).

Следует отметить, что формирование гидродинамического подпора после восстановления защитных свойств хранилища А создает также предпосылки для периферийного растекания жидкой фазы (см. рис. 2, б), что, очевидно, может привести к загрязнению новых площадей (объемов) вмещающих пород. Как следует из рис. 2, а, начальный фильтрационный поток, проходивший через хранилище Б, накапливался в зоне влияния хранилища А без периферийного растекания, ограничивая тем самым площадь распространения возможного загрязнения.

Таким образом, важное мероприятие по выводу из эксплуатации без учета гидрогеологических особенностей и характера размещения хранилищ может стимулировать негативные экологические последствия, вызывая необходимость коррекции многочисленных критериев и ранжирования по опасности [3, 7].

Сценарий 2. На рис. 3 показаны гидродинамическое поле и распространение рН, сформированные до и после корректирующих воздействий вблизи группы из пяти хранилищ, эксплуатируемых с начала 1960-х гг. Перед корректирующими воздействиями участки размещения хранилищ А и Б соответствовали критериям $K_1 \gg K_0$, В, Г, Д — критериям $K_1 = K_0$ (см. рис. 3, а). Корректирующие воздействия были осуществлены на участках размещения хранилищ А и Б. После завершения корректирующих воздействий в течение 5 лет формировалось новое фильтрационное поле, которое фиксировалось по 22 наблюдательным скважинам, пробуренным в ближней зоне хранилищ А—Д. По истечении 5 лет было установлено, что фильтрационный поток стабилизировался и принял форму, приведенную на рис. 3, б. После восстановления защитных свойств инженерных барьеров хранилищ А и Б произошли изменения как в ближней зоне восстановленных хранилищ, так и в периферийных В, Г, Д. Первоначальный фильтрационный поток (см. рис. 3, а), ориенти-

рованный по направлению к хранилищам *A* и *B*, деформировался и начал их огищать, формируя подпор в ближней зоне хранилища *B*, также деформируя периферийные ареолы распространения повышенных значений *pH*, значит, содержащих радионуклиды, выходящие за пределы ближней зоны хранилищ *G* и *D* (см. рис. 3, б). Данный пример показывает, что вторичное техногенное воздействие, обусловленное восстановлением инженерных барьеров хранилищ, может стимулировать принятие дополнительных технических решений о необходимости вывода прилегающих территорий из эксплуатации, а не только самих хранилищ.

Число хранилищ и их пространственная ориентация на площадках размещения отходов различны в каждом регионе. Поэтому в зависимости от природно-климатических и геолого-гидрогеологических условий их вывод из эксплуатации должен происходить в определенной последовательности и, очевидно, в определенные временные интервалы. Для каждого участка необходимо использовать свой сценарий, предварительно проводя прогнозные оценки возможных вторичных техногенных воздействий. Единого сценария для вывода из эксплуатации приповерхностных хранилищ, учитывая региональную природную уникальность каждой площадки, нет.

Таким образом, на примерах сценариев вывода из эксплуатации хранилищ радиоактивных отходов показано, что:

восстановление изолирующих свойств инженерных барьеров также является одним из видов техногенного воздействия на окружающую среду;

восстановление защитных свойств только части хранилищ может привести к формированию вторичных периферийных участков радионуклидного загрязнения;

характер изменения гидрогеологических условий техногенного водоносного горизонта в ближней зоне хранилищ должен учитываться при проведении корректирующих воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мартьянов В.В.** Формирование фильтрационных полей вблизи размещения приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов. — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 6, с. 334—338.
2. **Мартьянов В.В.** О качестве свойств геологических барьеров в процессе сооружения и эксплуатации приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. — Медицина труда и промышленная экология, 2009, № 3, с. 7—10.
3. **Коренков И.П., Лашенцова Т.Н., Веселов Е.И. и др.** Радиозкологические подходы к ранжированию радиационно опасных объектов. — Гигиена и санитария, 2011, № 4, с. 16—20.
4. **Соболев И.А., Коренков И.П., Хомчик Л.М., Проказова Л.М.** Охрана окружающей среды при обезвреживании радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. **Мартьянов В.В.** Техногенез и его влияние на миграцию радионуклидов на участках размещения приповерхностных хранилищ. — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 6, с. 339—343.
6. **Мартьянов В.В., Коренков И.П.** Поведение радионуклидов при их длительном хранении в хранилищах приповерхностного типа. — АНРИ, 2011, № 1, с. 49—55.
7. **Шарафутдинов Р.Б., Кузнецов Л.А., Денисов В.А. и др.** О ранжировании хранилищ твердых радиоактивных отходов предприятий ядерного топливного цикла по потенциальной опасности. — Ядерная и радиационная безопасность, 2010, № 1, с. 10—15.

Поступила в Редакцию 1.03.12

УДК 621.039.73.666.94

ИММОБИЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ПОРИСТЫХ ЦЕМЕНТНЫХ МАТРИЦ

Варлаков А.П., Германов А.В. (ОАО «ВНИИНМ», г. Москва)

Большой класс радиоактивных отходов представлен жидкими органическими отходами, для переработки которых применяют термические методы: сжигание и пиролиз. Для некоторых отходов предлагают очистку, окисление и кислотное растворение [1]. Перечисленные методы требуют сложного и дорогостоящего обо-

рудования и высокой квалификации персонала. Переработка отходов сопровождается образованием вторичных радиоактивных и часто химически вредных отходов. Так как методы направлены, как правило, на переработку отходов определенного состава, то их применение может быть экономически целесообразным только при