

Ориентировочно можно ожидать, что при последующей эксплуатации до 2020 г. в тех же условиях будет достигнут критический флюенс нейтронов и прочность графита снизится до уровня (20 МПа), допускающего возможность дальнейшей безопасной работы графита в кладках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платонов П.А., Бурдаков Н.С., Карпунин В.И. и др. Исследование графита кладок действующих реакторов. — В кн.: Межд. конф. по радиационному материаловедению (22—25 мая, 1990 г., Алушта), т. 3, Харьков, 1990, с. 172—179.
2. Виргильев Ю.С., Белинская Н.Т., Гулдоров В.В. и др. Изменение свойств графита из кладки реактора первой АЭС в процессе эксплуатации. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 3, с. 175—183.
3. Свойства реакторного графита и их изменение после облучения. Справочник. Под ред. Ю.С. Виргильева. М., НИИграфит, 1973. 80 с.
4. Виргильев Ю.С. Реакторный графит и его свойства. М., ЦНИИЭкономформцветмет, 1990. 52 с.
5. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. 272 с.
6. Акимов И.С., Куршапов А.В. Деформация графитовой кладки реакторов ЭГП-6 Билибинской АЭС под действием облучения. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 1, с. 26—33.
7. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов. НИКИЭТ, ИЛЭ, НИИграфит, ЧПИ, НГР-01-90. М., 1990. 253 с.
8. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Шипков Н.Н. Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.
9. Виргильев Ю.С. Реакторный графит и его ресурс. — Физика и химия обработки материалов, 1992, № 2, с. 5—14.

Поступила в Редакцию 8.07.98

УДК 621.039.75.16

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ ГЛУБИННОМ ЗАХОРОНЕНИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

*Косарева И.М., Савушкина М.К., Архипова М.М. (Институт физической химии РАН), Волин Ю.М., Кабакчи С.А. (ГНЦ РФ — НИФХИ им. Л.Я. Карпова),
Егоров Н.Н., Раков Н.А., Кудрявцев Е.Г. (Минатом РФ)*

Глубинное удаление жидких радиоактивных отходов в пористые геологические формации является одним из способов обращения с отходами, реализованных в России [1]. Надежность локализации отходов в подземных хранилищах определяется прежде всего геологическими параметрами среды, которая должна гарантированно их изолировать от поверхности и водоносных горизонтов. Наряду с этим отходы, представляющие собой сложную многокомпонентную систему, могут влиять на геохимическое равновесие и изменять условия нахождения в подземном хранилище [2, 3]. Поэтому долгосрочный прогноз состояния подземного хранилища радиоактивных отходов невозможен без знания основных физико-химических превращений, происходящих в системе жидкие отходы — подземные воды — породы пласта-хранилища [4, 5].

Данные о поведении макрокомпонентов отходов и радионуклидов в подземном хранилище, включая сорбционное накопление на породах, сосаждение на твердых фазах и др. [6—9], свидетельствуют о том, что основными параметрами, которые определяют направленность и глубину протекания физико-химических процессов, являются характеристики тепловых и радиационных полей, возникающих в пласте. На практике температуру пласта контролируют периодическими замерами в нагнетательной и наблюдательных скважинах. Получаемые при этом данные характеризуют отдельные точки подземного хранилища. Они не дают общей картины распределения тепловых полей в пласте и не позволяют определить местонахождение зоны с макси-

мальным разогревом и температуру в ней. В то же время для прогнозной оценки состояния компонентов отходов в разные периоды времени после захоронения необходимо знать распределение тепловых и дозовых нагрузок по всему хранилищу.

Подходы к определению энерговыделения и радиационных нагрузок при глубинном захоронении отходов описаны в работе [10]. В работе [11] приведена методика расчета температурных полей, возникающих при захоронении жидких отходов с добавкой цемента методом гидроразрыва пласта. Этот вариант существенно отличается от захоронения жидких отходов, поскольку присутствие цемента обуславливает перевод жидких отходов в твердое состояние, что кардинально меняет динамику процессов теплопереноса. В результате расчета тепловых полей, возникающих при захоронении жидких отходов [4, 7, 12], показано, что совпадение с экспериментальными данными достигается при учете конкретной технологии захоронения, включающей, кроме удаления отходов в пласт, также нагнетание подготавливающих и оттесняющих растворов. Такой вывод очевиден, поскольку подача больших порций неактивных растворов существенно снижает концентрацию радионуклидов — источников тепла в системе и изменяет условия теплопереноса. К сожалению, в цитируемых работах отсутствуют детали математических моделей, а также неизвестно их программное обеспечение, что не позволяет проводить расчеты для других условий захоронения.

Обобщая известные данные, можно заключить, что текущее состояние подземного хранилища отходов можно охарактеризовать на основании модели, включающей следующие блоки:

описание технологии удаления отходов в пласт-хранилище;

блок расчета энерговыделения и радиационных нагрузок на пласт;

блок расчета температурных полей в подземном хранилище через различные периоды времени;

физико-химическую модель, характеризующую состояние компонентов отходов с учетом осадкообразования, сорбции, соосаждения и других процессов;

блок расчета миграции отдельных компонентов в подземных горизонтах.

Целью настоящего исследования было описание первых трех исходных блоков модели. Для общего случая тепловыделения и переноса в пласте-хранилище сформируем феноменологическую модель технологии глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов и обсудим принятые приближения и упрощения. Далее эту модель опишем математически и реализуем в форме компьютерной программы.

Феноменологическое описание глубинного захоронения отходов. В имеющейся технологии нагнетание жидких радиоактивных отходов в подземное хранилище осуществляется периодически, поэтапно. Каждый этап представляет собой трехстадийную процедуру: химическую обработку пласта путем закачки порции неактивного раствора $V_{на}$ (1-я стадия), закачку порции отходов $V_{отх}$ (2-я стадия) и их оттеснение от прифильтровой зоны подачей $V_{от}$ чистой воды или неактивного раствора (3-я стадия). Кроме того, через некоторый промежуток времени после окончания этапа в скважину периодически подается порциями холодная вода (неактивный раствор) для изучения возможности регулирования температуры пласта. На всех стадиях отходы, растворы или вода подаются в пласт с постоянным расходом G_w и температурой, равной температуре окружающей среды ($\sim 20^\circ\text{C}$).

Принята следующая приближенная модель размещения радионуклидов в подземном хранилище. На первом этапе 1-й стадией пренебрегаем, полагая, что химическая подготовка пласта не изменяет его теплофизических свойств. Далее считаем, что на 2-й стадии первого этапа захоронения (и всех последующих этапов) порция отходов размещается в пласте в цилиндре радиусом $r = \sqrt{(V_{отх})/(3,14\alpha m)}$, где $V_{отх}$ — объем закачанных отходов; α — пористость; m — мощность пласта.

Моделирование 3-й стадии (оттеснение) представляет трудности, поскольку точно не известно, происходит ли при введении оттесняющего раствора полная десорбция радионуклидов с минералов пласта. Поэтому при моделировании 3-й стадии первого и всех последующих этапов будем рассматривать два предельных случая: идеального смешения (далее — «со смешением»), когда полагается, что порция отходов полностью смешивается с подаваемой вслед за ней порцией оттесняющего раствора, радионуклиды остаются в районе нагнетательной скважины и размещаются в пласте в цилиндре радиусом $r_{см} = \sqrt{(V_{отх} + V_{от}) / (3,14\alpha m)}$, и идеального вытеснения (далее — «без смешения»), когда каждая порция оттесняющего раствора, как поршень, передвигает порцию отхода в глубь пласта. В этом случае отходы оказываются размещенными в пласте в слое, объем которого равен разности объемов цилиндров радиусом $r_{см}$ и r .

Модель второго и всех последующих этапов захоронения — такая же, как и первого, за исключением того, что химическая подготовка пласта рассматривается как введение в пласт некоторого объема неактивного раствора, идеально вытесняющего все ранее закачанные порции от нагнетательной скважины и полностью десорбирующего радионуклиды с минералов пласта у нагнетательной скважины.

Принятые приближения и упрощения. В обсуждаемой модели рассматривается упрощенная сферически симметричная задача, в которой «реальный» цилиндр заменен шаром равного объема. Предположим, что имеющиеся в порции отходов радионуклиды при захоронении распределяются по объему гомогенно и их удельная активность $Q_{см} = Q_{отх} V_{отх} / V_{пл}$. Здесь $V_{пл}$ — объем пласта, где сосредоточены отходы, удаленные на заданном этапе захоронения; $Q_{отх}$ — удельная активность радиоактивных отходов.

Будем считать, что тепло, выделяющееся в результате распада радионуклидов — компонентов отходов, нагревает введенные в пласт растворы и породы пласта. Примем, что тепло по пласту переносится в результате молекулярной теплопроводности, и пренебрежем переносом тепла с естественным потоком воды в пласте. Не будем учитывать также вклад жидких отходов в теплофизические параметры пласта — удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности.

Удельное энерговыделение захороненных отходов в настоящей работе рассчитывали по методикам, изложенным в работах [10, 13]. Вследствие радиоактивного распада энерговыделение захороненных отходов снижается во времени. При определении временной функции изменения удельного энерговыделения радионуклидный состав представляли в двухгрупповом приближении — группа долго- ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ и $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$) и короткоживущих (все остальные) радиоактивных компонентов отхода и аппроксимировали временную зависимость удельного энерговыделения, нормированного к энерговыделению при $t = 0$ (момент захоронения), в виде суммы двух экспонент

$$y = a_1 \exp(-\alpha_1 t) + a_2 \exp(-\alpha_2 t), \quad (1)$$

коэффициенты которой определяются радионуклидным составом.

Математическая модель теплопереноса в пласте. Математическую модель теплопереноса в приближении сферической симметрии объема отходов и большого общего объема пласта представим в виде

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q(r, t) = c_p \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\partial T / \partial r(0, t) = 0, \quad t \geq 0; \quad (3)$$

$$T(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0; \quad (4)$$

$$T(r, 0) = 0, \quad r \geq 0, \quad (5)$$

где λ — теплопроводность пласта; T — температура, отсчитываемая от уровня окружающей среды (т.е. разность между истинной температурой и температурой окружа-

ющей среды); r — радиус; t — время; $q(r, t)$ — удельное тепловыделение (тепловыделение в единице объема пласта в единицу времени). Уравнения (3), (4) выражают краевые условия, выражение (5) — начальное условие.

Для случая, когда радиоактивный раствор вводится в пласт один раз в момент времени $t = 0$, зависимость $q(r, t)$ может быть представлена в виде (аппроксимация через сумму двух экспонент)

$$q(r, t) = q_0(r)y, \quad (6)$$

где $q_0(r)$ — начальное удельное тепловыделение; y — функция (1). При равномерном распределении радиоактивного вещества в шаровом объеме радиусом r_0

$$q_0(r) = \begin{cases} q_0 & \text{при } 0 \leq r \leq r_0; \\ 0 & \text{при } r > r_0, \end{cases} \quad (7)$$

где $r_0 = (3V/4\pi\alpha)^{1/3}$. Здесь V — объем вводимого раствора; α — пористость пласта.

Для случая, когда отходы удаляют в пласт многократно, примем, что это происходит в моменты $t_0, t_1, \dots, t_N$ длительностью $\tau_0, \dots, \tau_N$, которую считаем малой по сравнению с интервалом времени между этапами. Будем считать, что на интервале от t_i до $t_i + \tau_i$ осуществляется i -й этап ввода отходов и при этом радионуклиды после ввода равномерно распределяются по некоторому шаровому объему. Тогда при определении функции $q(r, t)$ необходимо для каждой (r, t) учесть, какому этапу отвечает состав отходов на радиусе r в момент времени t и каковы характеристики раствора, вводимого на данном этапе. Этот учет может быть выполнен следующим образом.

Введем целочисленные функции $i(r, t)$, $j(r, t)$, $j(r, t) = 1$, если в момент t в точке r присутствуют радионуклиды, в противном случае $j(r, t) = 0$. Функция $i(r, t)$ принимает значения $0, \dots, N$, которые определяют этап, от которого в момент времени t присутствуют радионуклиды в точке r . Пусть q_{0i}, q_{1i}, q_{2i} — параметры отходов для i -го этапа ($i = 0, \dots, N$). Тогда

$$q(r, t) = q_{0i} \left[a_{1i} \exp(-\alpha_1(t - t_i)) \right] + a_{2i} \exp[-\alpha_2(t - t_i)] j(r, t), \quad (8)$$

где $i = i(r, t)$.

При рассмотрении пространственного распределения радионуклидов в пласте будем исходить из следующего предположения. Как было упомянуто, каждый этап захоронения состоит из трех стадий. На 1-й стадии вводится неактивный раствор объемом V_{1i} , на 2-й стадии — активный раствор объемом V_{2i} , на 3-й стадии — неактивный раствор оттеснения объемом V_{3i} . Здесь будем рассматривать два случая — без смешения объемов стадий и со смешением. В первом случае (идеального вытеснения) введенные в пласт объемы будут последовательно занимать шаровые зоны объемом V_{1i}/α , V_{2i}/α , V_{3i}/α и будет сохраняться сферическая симметрия. Во втором случае (идеальное смешение) будем считать, что радионуклиды равномерно распределяются по объему, определяемому 2-й и 3-й стадиями. Функции $i(r, t)$, $j(r, t)$ определяются моментами $t_0, t_1, \dots, t_N$ и объемами V_{1i}, V_{2i}, V_{3i} ($i = 0, \dots, N$) и легко могут быть выписаны в явном виде для каждого рассмотренного случая.

Вместо радиоактивного раствора в подземное хранилище может вводиться вода для регулирования температуры. Математически этот случай может рассматриваться как частный описанного, когда $V_{2i} = 0$, $V_{3i} = 0$.

Математическая модель (2) — (5) описывает теплоперенос в моменты времени, отличные от интервалов этапов $(t_0, t_0 + \tau_0), \dots, (t_N, t_N + \tau_N)$. В моменты времени от t_i до

$t_i + \tau_i$ процесс описывается уравнениями конвективной диффузии, в которых можно пренебречь членами, связанными с тепловыделением, в силу малости τ_i :

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} u_w \frac{\partial T}{\partial r} = c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad r \geq 0, \quad t_i \leq t \leq t_i + \tau_i; \quad (9)$$

$$T(0, r) = 0; \quad (10)$$

$$T(\infty, t) = 0; \quad (11)$$

$$u_w = \frac{1}{4\pi} c_w G_w, \quad (12)$$

где G_w , c_w — расход и теплоемкость закачиваемого раствора соответственно.

Таким образом, в случае однократного нагнетания раствора математическая модель тепловыделения представляет собой систему уравнений (2)—(7), в случае многократного — систему уравнений (2)—(5), (8)—(12). В последнем случае уравнения (9)—(12) описывают процесс в периоды закачивания раствора, уравнения (2)—(5) — в остальные моменты времени.

Компьютерная модель. Теплоперенос рассчитывали с применением неявной разностной схемы [14], реализующей быстрый, надежный и универсальный подход к решению задачи. Радиус R_1 , до которого следует интегрировать уравнения (2) и (9), был определен эмпирическим путем.

На основе разностного неявного метода была разработана на языке Си программа HEAT, позволяющая рассчитывать теплоперенос при одно- и многократном вводе радиоактивного раствора в подземное хранилище. Неявная схема позволяет двигаться при интегрировании с достаточно большими временными шагами, и весь расчет занимает меньше 1 мин процессорного времени на PC Pentium, 100 МГц.

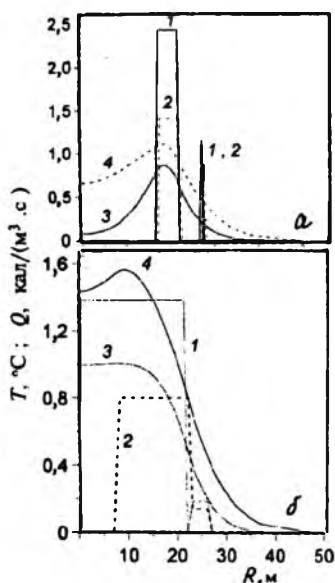
В программе в качестве входных использованы параметры пласта — мощность (m), пористость (α), удельная теплоемкость (c_p) и коэффициент теплопроводности (λ), объем удаляемых в пласт жидкостей — подготовительного раствора ($V_{на}$), отходов ($V_{отх}$), раствора и воды на оттеснение ($V_{от}$); энергетическая характеристика отходов (удельная активность $Q_{отх}$ и радионуклидный состав); параметры технологического процесса — расход при закачке растворов в пласт (G_w) и время начала и конца этапов захоронения.

Результатами расчета являются зависимости температуры пласта от времени в его заданных точках, температуры и удельного энерговыделения в пласте в зависимости от расстояния в произвольно заданное время от начала захоронения.

Исходные данные для верификации модели. Для верификации разработанной компьютерной модели использовали данные об объеме и характеристиках отходов, удаленных на первом и втором этапах захоронения, в том числе объемах подготовительных, оттесняющих растворов и температурных полях, наблюдавшихся при глубинном захоронении жидких отходов на Горно-химическом комбинате Красноярск-26 [12]. В соответствии с составом удаляемых отходов были рассчитаны коэффициенты функции (1) (они вычислены с помощью пакета CurveExpert 1.3., GoldenSoftware): безразмерные $a_1 = 0,69825094$ и $a_2 = 0,30099464$ и показатели экспонент (c^{-1}) $\alpha_1 = 0,28183074$ и $\alpha_2 = 0,0083506043$, где t — время в единицах 10^7 с. Коэффициенты a_1 , a_2 и α_1 , α_2 примерно соответствуют сумме содержания и постоянным распада групп коротко- и долгоживущих радионуклидов в отходах. Геологические параметры пласта захоронения [4] — пористость $\alpha = 0,1$, мощность $m = 15$ м. Теплофизические параметры — удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности равны 55 130 кДж/(м³·град) и 2310 кДж/(м³·град). Теплоемкость отходов принимали равной теплоемкости воды 4190 кДж/(м³·град).

Результаты моделирования. Результаты расчета изменения температуры от времени [12] совпадают с измеренными (рис. 1), если рассматривать вариант со смешением отходов и оттесняющего раствора. Расчет варианта без смешения дает низкую (на десятки градусов ниже измеренной) температуру в прифилтровой зоне скважины. Четкий минимум на расчетной кривой в момент начала второго этапа обусловлен тем, что в нагретый пласт подают холодные растворы для его подготовки, отходы и оттесняющий раствор. При измерениях, однако, снижения температуры в прифилтровой зоне скважины не зафиксировано, поскольку их, по-видимому, проводили после завершения всех технологических операций этапа.

Р и с. 1. Временная зависимость температуры в нагнетательной скважине после двух этапов захоронения отходов и подачи холодной воды: 1 — результаты измерений; 2 — расчет (здесь и далее под «температурой» понимается превышение температуры пласта с захороненными отходами над естественной температурой пласта)



Р и с. 2. Распределение удельного энерговыделения через 2 (1) и 3,5 года (2) и температуры через 2 (3) и 3,5 года (4) после начала кампании в зависимости от расстояния до нагнетательной скважины

Учитывая значимость смешения отходов с оттесняющими растворами для прогнозных оценок поведения их компонентов в подземном хранилище, тщательно были рассмотрены результаты моделирования обоих вариантов (без смешения и со смешением) при прочих равных условиях. Результаты в виде распределения энерговыделения и температуры по расстоянию до нагнетательной скважины через 2 года (после завершения второго этапа) и через 3,5 года от начала кампании приведены на рис. 2. Можно видеть существенное влияние эффекта смешения отходов и оттесняющего раствора на характеристики тепловых полей вокруг нагнетательной скважины. В варианте без смешения (см. рис. 2, а) энерговыделение, обусловленное отходами, закачанными на разных этапах, происходит в неперекрывающихся областях пласта, максимальная температура в пласте располагается на некотором расстоянии от прифилтровой зоны. В случае со смешением (см. рис. 2, б) энерговыделение, обусловленное отходами, удаленными на обоих этапах, происходит почти в одной и той же области пласта. В результате создаются более благоприятные условия для энергопереноса, что влечет за собой качественно иное распределение тепловых нагрузок в подземном хранилище. Так, в самой нагнетательной скважине ($x = 0$) в варианте без смешения через 2 года должна установиться температура на 10°C выше пластовой, через 3,5 года — на 60°C . В варианте со смешением соответствующее превышение температуры равно 100 и 140°C , что близко к реальным данным (см. рис. 1). Существенно различаются и максимальная температура, и характер распределения температуры по пласту. Если в первом случае (см. рис. 2, а) максимальная температура составляет $\sim 80^\circ\text{C}$ (через 2 года), область с максимальной температурой достаточно узкая и совпадает с местонахождением отходов, то во втором случае (см. рис. 2, б) отмечается равномерный прогрев всего пласта от нагнетательной скважины до зоны расположения отходов.

Рассмотренные два случая, без сомнения, являются предельными. На практике реализуется некий промежуточный вариант частичного смешения при введении оттесняющего раствора. Такой значительно более сложный случай предполагается смоделировать при дальнейшем совершенствовании разработанной модели.

Компьютерная программа HEAT позволяет исследовать тепловые поля в подземном хранилище в процессе нагнетания в него холодной воды после завершения этапа захоронения отходов. Результаты моделирования двухэтапного захоронения отходов с подачей и без подачи охлаждающей воды в нагнетательную скважину через 1 год после проведения второго этапа (рис. 3) свидетельствуют о том, что без ввода охлаждающей воды температура в нагнетательной скважине после снижения, обусловленного закачкой холодной порции отходов на втором этапе, возрастает и через некоторое время становится равной максимальной температуре в пласте. В случае подачи в пласт холодной воды температура в скважине снижается. Однако со временем она вновь возрастает и достигает прежнего значения.

Нами было также оценено влияние холодной воды на распределение температуры в пласте, т.е. на некотором удалении от нагнетательной скважины. На рис. 4 приведена зависимость расположения максимально нагретого слоя пласта от времени без и с подачей в него холодной воды. Видно, что до начала второго этапа максимум температуры находился в зоне нагнетательной скважины ($y = 0$). После подачи холодных растворов (начало второго этапа) максимум температуры смещается в глубь пласта. Если холодная вода в пласт не подается, то максимум температуры быстро «возвращается» в первоначальное положение. При подаче холодной воды (кривая 2) максимальная температура в течение некоторого времени отмечается в глубине пласта, но затем «возвращается» в район нагнетательной скважины, хотя и медленнее, чем в первом случае.

На рис. 5 приведена пространственная диаграмма, позволяющая оценить температурное поле в подземном хранилище при двух условиях: без подачи (а) и с подачей (б) охлаждающей воды. Можно видеть, что подача охлаждающей воды приводит к резкому снижению температуры в хранилище и смещению максимально нагретого слоя в глубь пласта. В целом характеристики температурного поля на некотором расстоянии от скважины можно считать неизменными. С течением времени и в самой скважине температура снова увеличивается, хотя и не достигает того значения, которое она имела бы, если бы охлаждение не проводилось.

Таким образом, на основе сформулированной феноменологической модели процесса подземного захоронения радиоактивных отходов созданы упрощенная математическая модель теплопереноса в подземном хранилище и быстродействующая компьютерная программа для ее описания. Программа, верифицированная по реальным данным, позволяет рассчитывать распределение тепловыделения и температуры в любой точке пласта для заданного сценария захоронения отходов. Это дает возможность оце-

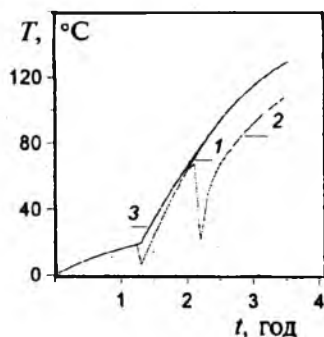


Рис. 3. Временная зависимость температуры в нагнетательной скважине при моделировании захоронения отходов без подачи холодной воды (1) и с вводом холодной воды через 1 год после начала второго этапа (2), временная зависимость максимальной температуры в пласте (3)

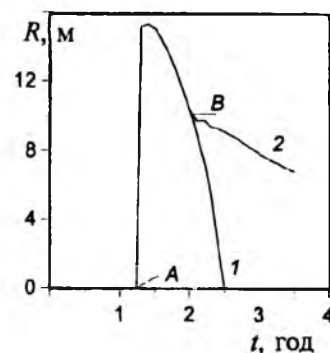


Рис. 4. Расстояние от максимально нагретого слоя пласта до нагнетательной скважины в зависимости от времени после начала захоронения отходов без охлаждения (1) и с закачкой охлаждающей воды (2): А — начало второго этапа закачки отходов; В — момент ввода порции охлаждающей воды

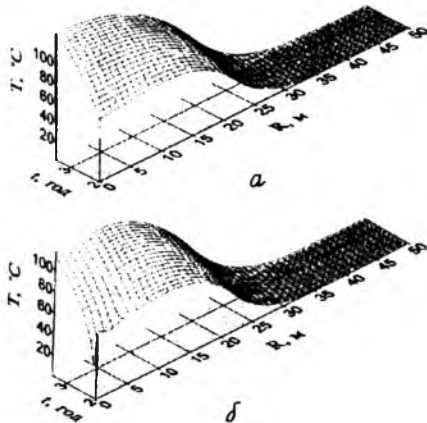


Рис. 5. Распределение температуры в подземном хранилище при времени, превышающем 2 года от начала кампании (условия расчета такие же, как для рис. 4)

нивать текущее состояние системы жидкие отходы—вмещающая порода и прогнозировать ее реакцию на изменение технологии нагнетания, в частности, подачу холодной воды. Проведение таких расчетов для конкретных условий позволит обосновать наиболее безопасные режимы нагнетания с точки зрения ограничения максимальной температуры в хранилище и локализации тепловых полей в заданном объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.
2. Косарева И.М., Савушкина М.К., Носухин А.В. Некоторые закономерности поведения компонентов жидких РАО в глубинных пластах-коллекторах. Тезисы докладов 4-й Научно-технич. конф. ЯО, Нижний Новгород, 1993, с. 988—989.
3. Косарева И.М., Савушкина М.К., Кудрявцев Е.Г. и др. Обоснование физико-химических процессов, определяющих состояние компонентов жидких радиоактивных отходов в подземном хранилище. — In: *Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*. Berlin, ASME, 1995, p. 661—666.
4. Юдин Ф.П. Тепловой фактор в проблеме подземного захоронения жидких радиоактивных отходов. — Труды научно-технич. конф. «Исследования в области обезвреживания жидких, твердых и газообразных радиоактивных отходов и дезактивации загрязненных поверхностей». 2—7 октября 1972 г. Колобжег, Польша. Варшава, СЭВ, 1973, с. 36—45.
5. Савушкина М.К., Косарева И.К., Раков Н.А. Оценка радиационной и термической устойчивости пород подземного хранилища жидких радиоактивных отходов. — In: *Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*. Berlin, ASME, 1995. p. 667—669.
6. Косарева И.М., Савушкина М.К. Исследование физико-химических процессов, определяющих условия локализации радионуклидов в хранилищах РАО. — Труды 8-й Ежегодной научно-технич. конф. ЯО России, 1997, с. 134.
7. Окуньков Г.А. К определению интенсивности тепловыделения в радиоактивном источнике тепла по экспериментальному замеренной температуре в скважине. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Геология и горное дело, 1986, с. 48—54.
8. Савушкина М.К., Косарева И.М., Карпова Л.Н. Исследование поведения радионуклидов — продуктов деления в условиях подземного хранилища жидких РАО. — Труды 2-й Российской конференции по радиохимии. Димитровград, 1997, с. 113.
9. Иванов М.Ф., Окуньков Г.А., Рыбальченко А.И. Прогнозирование миграции жидких радиоактивных отходов в пласте-коллекторе с учетом различия плотности и вязкости отходов и пластовых вод. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Промышленная радиозекология и горное дело. Вып. 1. М., ЦНИИУЭИ, 1995, с. 14—23.
10. Балукова В.Д., Кабакчи С.А., Косарева И.М. Радиационные нагрузки в подземных хранилищах и методы регулирования удельного содержания радионуклидов. — В кн.: *Исследования в области обезвреживания жидких, твердых и газообразных радиоактивных отходов и дезактивации загрязненных поверхностей*. М.: Атомиздат, 1978, с. 48—53.
11. Бурмистрова Н.М., Окуньков Г.А., Юдин Ф.П. К расчету температурного поля среды, вмещающей радиоактивные отходы. — Там же, с. 34—37.
12. Спицын В.И., Пименов М.К., Балукова В.Д. и др. Основные предпосылки и практика использования глубоких водоносных горизонтов для захоронения жидких радиоактивных отходов. — *Атомная энергия*, 1978, т. 4, вып. 2, с. 161—168.
13. Кабакчи С.А., Булгакова Г.П. Радиационная химия в ядерном топливном цикле. М., Изд. центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1997, с. 93—94.
14. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1987. 288 с.

Поступила в Редакцию 14.10.98

УДК 621.039.76

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Пузанов Ю.В., Соболев И.А., Ожован М.И., Тимофеев Е.М.,
Батюхнова О.Г. (МосНПО «Радон»)

В Законе РФ [1] дано определение радиационной безопасности как состояния защищенности людей от вредного воздействия ионизирующего излучения.