

позволяет достичь очень низкого уровня риска серьезных аварий за счет проведения мероприятий «лучшая практика».

Совершенствование открытого топливного цикла может дать настолько значительные преимущества управления отходами, что с ними смогут сравниться преимущества, на которые претендует более дорогие замкнутые топливные циклы.

Нынешний международный режим гарантий не соответствует проблемам безопасности расширенного развития атомной энергетики, как это предусмотрено сценарием глобального развития. Экспансия атомной энергетики также будет критично воспринята общественностью. Исследование свидетельствует о том, что общественное мнение не считает развитие атомной энергетики способом решения проблемы глобального потепления, предлагая использованных источников

#### Список литературы:

1. Будущее атомной энергетики/ Междисциплинарное исследование Массачусетского технологического института./ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/FAE1.pdf>

#### Использование глинистых материалов в создании барьера безопасности для выводимого из эксплуатации реактора АД

*Чубреев Д.О., Антоненко М.В., Кузнецов Г.В. \**

*ФГУП «Горно-химический комбинат», Россия, г. Железногорск*

*\* НИ Томский политехнический университете, Россия, г.Томск*

*dimanch@mail2000.ru.*

Реактор АД представляет собой одноцелевой проточный промышленный уран-графитовый реактор на тепловых нейтронах, размещенный в глубине горного массива в скальных выработках Ангаро-Канского гидрогеологического массива. Данные породы характеризуются низкой пористостью и проницаемостью. Скорость фильтрации воды находится в диапазоне 0.15-110 м/год [1]. Реактор остановлен 30.06.1992 г. для вывода из эксплуатации по варианту безопасного захоронения на месте.

Согласно ФЗ «Об использовании атомной энергии» при хранении или при захоронении радиоактивных отходов должны быть обеспечены их надежная изоляция от окружающей среды, защита настоящего и будущих поколений, биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх установленных норм.

В соответствии с [2] для изоляции радионуклидов от окружающей среды создаются дополнительные барьеры безопасности. Барьеры сооружаются за пределами и в пределах шахты реактора и хранилищ твердых РАО, находящихся на площадке размещения реактора.

В работе [3] рассмотрен процесс миграции  $C^{14}$  в окружающую среду. Главным дополнением данной работы к постановкам [3], с целью обоснования пригодности использования глины при выводе из эксплуатации реактора АД ФГУП «ГХК» по варианту захоронения на месте, проведено дополнительное моделирование влияния свойств глинистых пород, в частности вермикулита вспученного, бентонита Камалинского, Каолининовой глины и суглинка Березовского на долговечность глинистого барьера безопасности.

Цель работы – оценка влияния свойств глинистых пород на долговечность барьера и определение оптимального типа материала для использования в качестве барьерного. Предметом настоящей публикации являются результаты математического моделирования процессов диффузии и фильтрации  $C^{14}$  в создаваемом глинистом барьере.

Основными требованиями, предъявляемыми к барьерным материалам, являются: низкая водопроницаемость, высокая сорбционная способность по отношению к радионуклидам, стабильность свойств на протяжении времени, высокая пластичность и достаточная несущая способность.

ИФХЭ РАН проведен комплекс исследований образцов глинистых пород, включающий определение гранулометрического и минералогического состава пород, химических, водно-физических и сорбционных свойств пород [4].

Вертикальная диффузии и процесс конвективного переноса радионуклидов в увлажнённом слое грунта водами, фильтрующимися через слой твёрдых отходов, играют определяющую роль в процессе распространения радионуклидов [4]. За время существования ПЗРО радионуклиды могут проникнуть на значительную глубину, достигая уровня грунтовых вод [5].

Поэтому представляет практический интерес использование математических моделей, позволяющих быстро находить содержание радионуклидов в почве в любой момент времени. Результаты моделирования могут быть в дальнейшем использованы для анализа экологических последствий распространения загрязняющих веществ в окружающей среде.

**Задача.** Требуется установить распределение объемной активности радиоуглерода во времени и по глубине глинистого барьера безопасности, а также выявить наиболее подходящий материал для создания барьера безопасности.

Процесс распространения радиоуглерода описывается дифференциальным уравнением нестационарной диффузии при наличии фильтрационного движения влаги:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + \varphi \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация радионуклида в глине;  $t$  – время;  $x$  – пространственная координата;  $D$  – коэффициент диффузии радионуклида в глине;  $v$  – скорость движения радионуклида в глине под действием влаги;  $\lambda$  – постоянная распада радионуклида;  $\varphi$  – функция источника поступления радионуклида в глину.

Функция  $\varphi$  учитывает время  $t$  выщелачивания радиоуглерода из графитовой кладки и неравномерность распределения радионуклидов в ней.

Для решения поставленной задачи приняты следующие допущения: слой глины представляет собой пористую однородную среду  $0 < x < H$ , влага фильтруется с постоянной скоростью, в качестве загрязняющего вещества рассмотрен  $C^{14}$ , который не вступает в химическое взаимодействие. Также принято допущение, что процесс выщелачивания  $C^{14}$  из графитовой кладки происходит с постоянной скоростью. Численные решения нестационарного уравнения диффузии проводились методом конечных разностей в программе MatLab.

#### Исходные данные:

- Толщина глинистого барьера ( $H$ ) – 6 м;
- Скорость движения почвенной влаги ( $u$ ) – 1) 0,15 м/год;  
2) 55 м/год;  
3) 110 м/год.
- Период полураспада радиоуглерода ( $T$ ) – 5730 лет;
- Скорость поступления радионуклида в глину ( $\varphi$ ) –  $10^{-5} \div 10^{-6}$  кг/м<sup>2</sup>·сут;
- Начальная концентрация радионуклида на границе барьера ( $C$ ) –  $6,8 \cdot 10^{14}$  Бк/кг.
- Характеристики глинистых пород:

Глинистая порода		Вермикулит вспученный	Бентонит Камалински й	Каолинитова я глина	Суглинок Березовский
Параметры					
Содержание фракций частиц породы (%)	гравий	19,5	0,6	-	-
	песок	74,6	30,6	12,7	5,2
	пыль	-	54,7	66,7	90
	ил	-	14,1	20,6	4,8
Коэффициент межфазного распределения, $K_d$ (м <sup>3</sup> /кг)		0,25	0,12	0,02	0,1
Фактор задержки, $R$		600	3200	65	320
Плотность, $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )		150	1190	880	1310
Средняя влажность, $\theta$ (%)		71,4	55	58,8	31,8
Коэффициент диффузии, $D$ (м <sup>2</sup> /год)		0,76	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$

#### Начальные и граничные условия:

$$t = 0 : C = C_0, \quad 0 \leq x \leq H;$$

$$x = 0 : -D \frac{\partial C}{\partial x} = q_1, \quad t > 0;$$

$$x = H : -D \frac{\partial C}{\partial x} = q_2, \quad t > 0.$$

Методика решения.

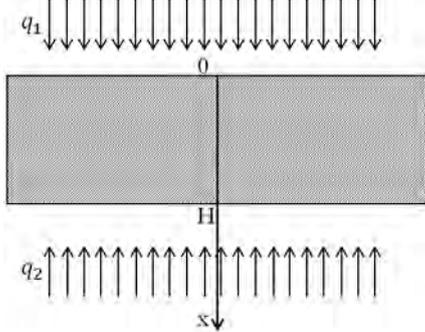


Рис.1 Геометрия задачи

На рис. 1 представлена геометрия данной задачи. Для ее решения методом конечных разностей построена конечно-разностная сетка (рис. 2).

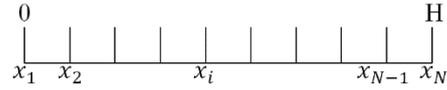


Рис.2. Конечно-разностная сетка:  $x_2, x_3, \dots, x_{N-1}$  – координаты внутренних узлов;  $x_1, x_N$  – координаты граничных узлов

Определено значение концентрации в  $i$ -ом узле в момент времени  $t = t_n = n \cdot \tau$  как  $T(x_i, t_n) = T_i^n$ , где  $\tau$  – шаг интегрирования по временной координате,  $n$  – номер шага по времени.

В уравнении (1) дифференциальные операторы заменены на их конечно-разностные аналоги и получено уравнение вида:

$$\frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} = D \cdot \left( \frac{C_{i+1}^{n+1} - 2C_i^{n+1} + C_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right) - v \cdot \left( \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{h} \right) - \lambda C + \varphi,$$

Полученное уравнение приведено к виду  $A_i \cdot C_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot C_i^{n+1} + E_i \cdot C_{i-1}^{n+1} = F_i$ :

$$\frac{D}{h^2} \cdot C_{i+1}^{n+1} - \left( \frac{2D}{h^2} + \frac{1}{\tau} + \frac{v}{h} \right) \cdot C_i^{n+1} + \frac{D}{h^2} \cdot C_{i-1}^{n+1} = \left( -\frac{1}{\tau} - \frac{v}{h} \right) \cdot C_i^n + \lambda C - \varphi,$$

Предположено, что существуют такие наборы чисел  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  ( $i = \overline{1, N-1}$ ), при которых

$$C_i^{n+1} = \alpha_i \cdot C_{i+1}^{n+1} + \beta_i, \quad \text{где } \alpha_i = \frac{A_i}{B_i - E_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad \beta_i = \frac{E_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - E_i \cdot \alpha_{i-1}}.$$

Проведена дискретизация граничных условий II рода с погрешностью  $O(h^2)$ . Используя левое граничное условие, функция  $C(x)$  разложена в ряд Тейлора в окрестности точки  $x=0$  до членов второго порядка относительно  $h$ :

$$C_2^{n+1} = C_1^{n+1} + h \cdot \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0}^{n+1} + \frac{h^2}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right|_{x=0}^{n+1}.$$

С учетом уравнения (1) получено:

$$C_1^{n+1} = \frac{2D\tau}{2D\tau + h^2} \cdot C_2^{n+1} + \frac{h^2}{2D\tau + h^2} \cdot C_1^n - \frac{h^2 D \tau (\lambda C - \varphi) - q_1 h \tau (2D + hv)}{D(2D\tau + h^2)},$$

где прогоночные коэффициенты в первом узле равны:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2D\tau}{2D\tau + h^2}; \\ \beta_1 = \frac{h^2}{2D\tau + h^2} \cdot C_1^n - \frac{h^2 D\tau(\lambda C - \varphi) - q_1 h\tau(2D + hv)}{D(2D\tau + h^2)}. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогично, используя правое граничное условие, функция  $C(x)$  разложена в ряд Тейлора в окрестности точки  $x=H$  до членов второго порядка относительно  $h$ :

$$C_{N-1}^{n+1} = C_N^{n+1} - h \cdot \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=H}^{n+1} + \frac{h^2}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right|_{x=H}^{n+1}.$$

Таким образом, найдено уравнение для  $C_N^{n+1}$ :

$$C_N^{n+1} = \frac{2D^2\tau\beta_{N-1} - \tau h^2 D(\lambda C - \varphi) - q_2 \tau h^2(2D - hv) + Dh^2 C_N^n}{2D^2\tau(1 - \alpha_{N-1}) + h^2}. \quad (3)$$

Для определения средней линейной скорости движения радиоуглерода под действием влаги использовано выражение  $v = \frac{\theta u}{K_d \rho}$  [6].

**Результаты и обсуждение.** Ранее [3] было установлено, что только в первые 1100 лет после создания барьеров безопасности возможно превышение уровня вмешательства (УВ) удельной концентрации радиоуглерода на выходе из графитовой кладки. В связи с этим для данного периода времени и четырех типов глинистых пород построена зависимость удельной концентрации радиоуглерода на выходе из глинистого барьера безопасности.

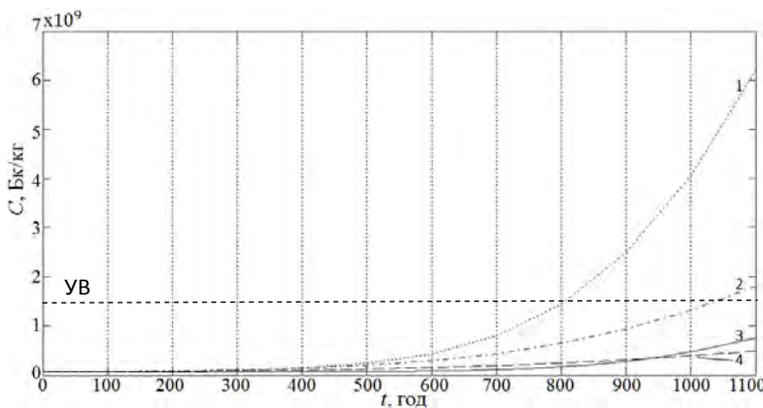


Рис.3. Удельная концентрация  $C^{14}$  на выходе из глинистого барьера: суглинок березовский (1), каолинистая глина (2), бентонит камалинский (3), вермикулит вспученный (4)

Из Рис. 3 видно, что лучшей глинистой породой на пути миграции радионуклида являются бентонит камалинский (3) и вермикулит вспученный (4). Для данных пород проведен анализ влияния сильных осадков на барьерную способность.

На рис. 4 приведено распределение удельной концентрации  $C^{14}$  по толщине глинистого барьера для скорости фильтрации влаги: а) 55 м/год; б) 110 м/год.

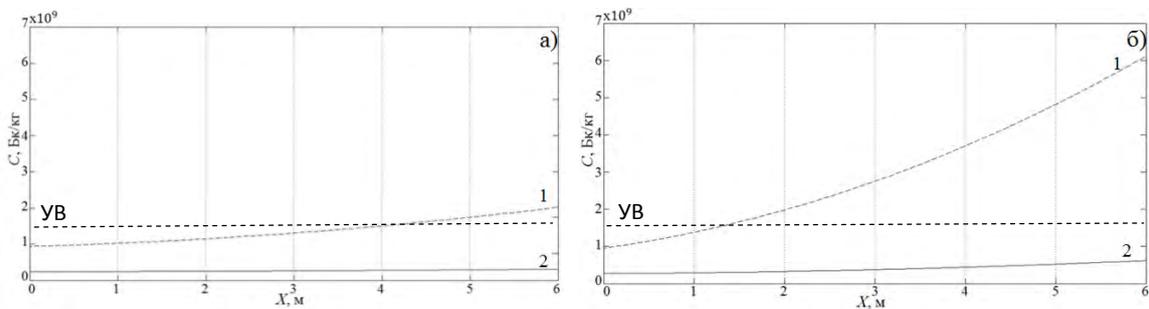


Рис.4 Удельная концентрация  $C^{14}$  по толщине барьера: вермикулит вспученный (1), бентонит камалинский (2)

Из рис. 4а,б видно, что для бентонита камалинского, при интенсивном увлажнении, например, в сезоны дождей, концентрация радиоуглерода по толщине барьера практически не меняется в отличие от вермикулита вспученного. Это обусловлено сильным отличием диффузионных свойств пород. Кроме того на величину водопроницаемости в сильной степени влияет порозность глинистой породы. Со временем происходит постепенное уплотнение и заиливание порового пространства [7].

Бентонит камалинский и вермикулит вспученный пригодны для использования в качестве материалов для создаваемых барьеров безопасности. В течение рассматриваемого периода времени (1100 лет) рассматриваемые материалы не допустят выхода радиоуглерода за пределы ПЗРО, кроме ситуаций интенсивных осадков. В случае обильных осадков противодиффузионные и противомиграционные свойства вермикулита заметно уступают бентониту.

**Выводы.** Данная модель использована для оценки миграции радионуклида в барьере безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД.

Размещение в геологических формациях с многобарьерной геотехнологической системой защиты – оптимальный по безопасности вариант научно обоснованного и технически доступного решения проблемы удаления РАО.

Пункт захоронения радиоактивных отходов является сложной многоуровневой геотехнологической системой, основное назначение которой – сохранить стабильность первоначальных условий изоляции радионуклидов в пространственно-ограниченном объеме недр в течение заданного интервала времен.

Наиболее вероятно, что и через 500 лет пласты глин будут сохранять свои гидроизолирующие и барьерные свойства, а сооруженный за пределами влияния тектонических разломов ПЗРО за время своей эксплуатации и консервации не будет разрушен и заполнен водой.

#### Список литературы:

1. Отчет о НИОКР «Сбор и систематизация имеющихся сведений о природных и техногенных условиях горного массива, вмещающего основные сооружения ФГУП «ГХК» для обоснования безопасности долговременной изоляции ОЯТ и/или РАО в подземных сооружениях комбината», ЗАО «Геоспецэкология», 2008 г.
2. Концепция ВЭ по методу «безопасное захоронение на месте»...
3. Антоненко М.В., Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В., Моделирование процесса диффузии радиоуглерода из активной зоны выводимого из эксплуатации ПУГР АД \ Атомная энергия 2015, Москва, т.118.
4. Отчет ИФХЭ РАН «определение сорбционных характеристик образцов глинистых пород»
5. В.М. Прохоров «Миграция радиоактивных загрязнений в почвах», Москва Энергоиздат 1981, 98 стр.
6. В.Г. Савоненков, Е.Б. Андерсон, С.И. Шабалев «Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов», Санкт-Петербург 2012, 215стр.
7. Базылев В.В. Параметры миграции радионуклидов из грунтовых могильников твёрдых радиоактивных отходов.//Вопросы радиационной безопасности.—1997. — № 1. — С. 31—35.
8. Кудряшов Н.А., Серебрякова И.Е. Математическое моделирование миграции долгоживущих радионуклидов в почве в результате радиоактивных выпадений // Атомная энергия. — 1993, — т. 74, — вып. 3, С. 243—247.

#### Традиционная атомная энергетика в России: состояние, проблемы, перспективы развития

*Шимохин П.А.*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

*E-mail: shimokhin.p@mail.ru*

Потребность в энергии растет намного быстрее, чем ее производство. Все большего внимания требует проблема исчерпаемости ископаемых энергоресурсов. Существует глобальная проблема парникового эффекта, накладывающая лимитирование на сжигание газа, нефти и угля на ТЭС. Возможности строительства новых гидроэлектростанций также весьма ограничены, в виду экологических и экономических факторов. Одним из вариантов решения данных проблем, может стать активное развитие ядерной энергетики.