

УДК 539.163:502.175

## Анализ коэффициентов снижения концентрации трассера инженерными барьерами

П.В. Амосов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН

<sup>2</sup> Физико-энергетический факультет Кольского филиала ПетрГУ, кафедра теплофизики

**Аннотация.** В статье представлен анализ коэффициентов снижения концентрации трассера в материалах защитных барьеров, которые предполагаются к использованию при создании объектов изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. В основу анализа положены результаты численных экспериментов нестационарного диффузионного переноса стабильного трассера в трехслойной системе "источник загрязнения – инженерный барьер – нарушенная зона массива". Исследован широкий диапазон значений наблюдаемых коэффициентов диффузии в разных зонах системы с учетом переменной толщины двух последних зон.

**Abstract.** The paper presents the analysis of coefficients of tracer concentration reduction in materials of protective barriers, which are supposed to be used at facilities for radioactive waste and spent nuclear fuel isolation. The analysis is based on the results of numerical experiments of non-stationary diffusion transfer of the stable tracer within a three-layer system "source of contamination – engineer barrier – excavation damaged zone of the host rock". A large scope of values of the observed diffusion coefficients in various zones of the system with account of the varying thickness of the two latter zones has been studied.

**Ключевые слова:** коэффициент снижения концентрации трассера, диффузионный перенос, трехслойная система, численный эксперимент, анализ результатов

**Key words:** coefficient of tracer concentration reduction, diffusion transfer, a three-layer system, numerical experiment, analysis of results

### 1. Постановка задачи

Инженерные барьеры представляют собой важную составляющую мультибарьерной системы объекта изоляции радиационно-опасных материалов (радиоактивные отходы и отработавшее ядерное топливо). При проектировании таких систем представляет интерес количественная характеристика способности барьера определенной толщины и химической природы (бетон, бентонит и др.) снижать концентрацию того или иного мигранта, высвобождающегося из объекта изоляции. Определяющим механизмом миграции трассера в системе инженерных барьеров (по крайней мере, в сценарии нормальной эволюции объекта) (Амосов и др., 2007) выступает диффузия. Для определения количественной характеристики способности барьера снизить концентрацию трассера при его диффузии через барьер решается следующая задача.

В одномерной постановке рассматривается трехзонаная система, состоящая из следующей последовательности зон: источник загрязнения (1), инженерный барьер (2), нарушенная зона массива (3) (НЗМ). Фиксируются два размера: общий размер системы – 9,0 м и размер зоны источника – 5,0 м. Начальная толщина инженерного барьера устанавливается равной 0,5 м. Далее с шагом 0,25 м увеличивается его размер до 1,5 м за счет сокращения области НЗМ с начальных 3,5 м до конечных 2,5 м.

Таким образом, предлагаемую к исследованию модель, в принципе, можно характеризовать, как модель постоянной толщины ближнего поля объекта. При этом размеры зоны инженерного барьера последовательно составят – 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м и 1,5 м, т.е. имеем пять вариантов конфигурации системы (см. рис. 1).

Начальные и граничные условия стандартные: в зоне источника загрязнения имеем постоянную концентрацию трассера (аналог модели предела растворимости), остальные две зоны системы в начальный момент времени являются незагрязненными. На внешней границе НЗМ предполагаем нулевое значение концентрации.



Рис. 1. Схематичное изображение вариантов конфигурации системы (2-я зона – инженерный барьер переменной толщины)

Выполненный автором с коллегами анализ наблюдаемых коэффициентов диффузии  $D_a$  для широкого набора радионуклидов показал, что для большой группы радиологически опасных изотопов диапазон изменения этого параметра составляет  $10^{-16}$ - $10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с (Амосов и др., 2004). В ранее выполненной работе авторы условно этот диапазон разбивали на три группы (Амосов и др., 2007):

- несорбирующиеся и очень слабо сорбирующиеся –  $10^{-12}$  до  $10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с;
- умеренно сорбирующиеся –  $10^{-14}$  до  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с;
- сильно сорбирующиеся –  $10^{-16}$  до  $10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с.

В каждой группе выбиралось пять значений, разбивающих ее на интервалы (например, для 2-й группы разбиение выглядит так:  $10^{-14}$ ,  $5 \cdot 10^{-14}$ ,  $10^{-13}$ ,  $5 \cdot 10^{-13}$ ,  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с) и далее простым перебором этих значений для каждой зоны описанной выше модели выполнялись расчеты. Результатом этих вычислений и последующей обработки полученной информации явилась подробная картина влияния значений наблюдаемых коэффициентов диффузии в каждой зоне модели на пространственное распределение концентрации стабильного трассера на определенное расчетное время (в нашем случае 50 тыс. лет). В каждой указанной группе получено 625 распределений (всего 1875). По мнению авторов (Амосов и др., 2007), полученные распределения дают необходимую инженерную информацию при обосновании выбора инженерных барьеров для долгоживущих радионуклидов.

В настоящей работе представлен анализ не пространственных распределений концентрации трассера, а коэффициента снижения концентрации трассера (КСКТ) инженерным барьером. При этом рассмотрен более широкий диапазон значений наблюдаемого коэффициента диффузии  $D_a$ , а именно, от  $10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с до  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с с шагом, равным декаде.

Для дальнейшего упрощения анализа результатов удобно ввести следующие обозначения наблюдаемых коэффициентов диффузии  $D_{aj}^i$ , где верхний индекс ( $i = 1,2,3$ ) соответствует трем зонам системы, а нижний индекс ( $j = 1,2,3,4,5$ ) соответствует пяти значениям наблюдаемых коэффициентов диффузии, как то:  $10^{-15}$ ,  $10^{-14}$ ,  $10^{-13}$ ,  $10^{-12}$  и  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

КСКТ инженерным барьером определим через отношение концентрации на входе в барьер  $C_{in}$  к концентрации трассера на выходе из барьера  $C_{out}$ , т.е.  $k = C_{in}/C_{out}$ . Именно поведение этого параметра (общее количество значений 625) и анализируется в дальнейшем.

## 2. Результаты расчетов и их анализ

Результаты анализа КСКТ в зависимости от толщины инженерного барьера представлены в табл. 1. В указанной таблице приведены максимальные и минимальные значения КСКТ, определенные по всей совокупности расчетных данных. Отметим два момента. Первый – тривиальный – с ростом толщины барьера увеличиваются значения КСКТ. Второй заключается в том, что для фиксированной геометрической конфигурации системы максимальные КСКТ соответствуют комбинации наблюдаемых коэффициентов диффузии ( $D_{a5}^1 D_{a1}^2 D_{a1}^3$ ), а минимальные – ( $D_{a3}^1 D_{a5}^2 D_{a5}^3$ ).

Таблица 1. Максимальные и минимальные значения коэффициентов снижения концентрации трассера

Значения $k$	Толщина инженерного барьера, м				
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
максимальные	0,386E+02	0,464E+03	0,743E+04	0,148E+06	0,354E+07
минимальные	0,103E+01	0,103E+01	0,103E+01	0,103E+01	0,104E+01

Приведем фрагмент табличного представления анализируемой информации. В частности, в табл. 2 представлены значения КСКТ инженерным барьером толщиной 1,0 м для указанных в таблице наблюдаемых коэффициентов диффузии.

Таблица 2. КСКТ при толщине инженерного барьера 1,0 м

Наблюдаемый коэффициент диффузии инженерного барьера	Наблюдаемый коэффициент диффузии области источника загрязнения – $D_{a1}^1$				
	Наблюдаемый коэффициент диффузии НЗМ				
	$D_{a1}^3$	$D_{a2}^3$	$D_{a3}^3$	$D_{a4}^3$	$D_{a5}^3$
$D_{a1}^2$	0,709E+04	0,637E+04	0,629E+04	0,627E+04	0,627E+04
$D_{a2}^2$	0,217E+02	0,148E+02	0,141E+02	0,140E+02	0,140E+02
$D_{a3}^2$	0,323E+01	0,173E+01	0,159E+01	0,158E+01	0,158E+01
$D_{a4}^2$	0,234E+01	0,114E+01	0,107E+01	0,107E+01	0,107E+01
$D_{a5}^2$	0,227E+01	0,110E+01	0,104E+01	0,103E+01	0,103E+01

Отметим широкий разброс значений КСКТ – от 1 до 7 тысяч, что отвечает физической картине моделируемой системы. Максимально проводящим 2-й и 3-й зонам системы (в данной ситуации  $D^1_{a1}D^2_{a3}D^3_{a5}$ ) отвечает минимум коэффициента снижения и, наоборот – для минимально проводящих зон системы ( $D^1_{a1}D^2_{a1}D^3_{a1}$ ) – имеем максимальный коэффициент снижения. Кроме того, хорошо видно, что поведение КСКТ может быть описано простой монотонной функцией, как по строкам, так и по столбцам таблицы.

Проиллюстрируем результаты графическими примерами. Кривые рис. 2 иллюстрируют поведение КСКТ в зависимости от толщины барьера. Построенные кривые соответствуют следующей комбинации наблюдаемых коэффициентов диффузии ( $D^1_{aj}D^2_{a3}D^3_{a3}$ ,  $j = 1,5$ ), т.е. фиксировались значения наблюдаемых коэффициентов диффузии 2-й и 3-й зон системы, но варьировались значения  $D_a$  для 1-й зоны. Представленные кривые подтверждают и наглядно иллюстрируют вышеприведенный тезис: именно максимально проводящая 1-я зона обеспечивает наилучшие защитные свойства системы. В то же время можно отметить, что для диапазона значений наблюдаемых коэффициентов диффузии 1-й зоны от  $10^{-15}$  до  $10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с разброс в величинах КСКТ достаточно невелик по сравнению с эффектом влияния более проводящей зоны ( $10^{-12}$  –  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с).

Представленные кривые можно попытаться аппроксимировать, например, линейными функциями типа  $k = \beta_0 + \beta_1 x$ , где  $x$  – толщина инженерного барьера. Значения  $\beta_0$  и  $\beta_1$  для соответствующей комбинации наблюдаемых коэффициентов диффузии приведены ниже:

Комбинация	$\beta_0$	$\beta_1$
$D^1_{a1}D^2_{a3}D^3_{a3}$	1,058	0,732
$D^1_{a2}D^2_{a3}D^3_{a3}$	1,060	0,436
$D^1_{a3}D^2_{a3}D^3_{a3}$	0,612	1,052
$D^1_{a4}D^2_{a3}D^3_{a3}$	0,080	5,030
$D^1_{a5}D^2_{a3}D^3_{a3}$	-1,174	16,00

Приведенные значения коэффициентов аппроксимирующих функций позволяют выполнить прогноз значений КСКТ при вариации толщины инженерных барьеров для проанализированных комбинаций наблюдаемых коэффициентов диффузии.

На рис. 3 представлена ситуация для комбинаций наблюдаемых коэффициентов диффузии ( $D^1_{a3}D^2_{aj}D^3_{a3}$ ,  $j=1,5$ ) с учетом вариации толщины инженерного барьера, т.е. фиксировались значения наблюдаемых коэффициентов диффузии 1-й и 3-й зон системы, но варьировались значения  $D_a$  для 2-й зоны. Так же, как и кривые рис. 2, графики КСКТ для обсуждаемых комбинаций наблюдаемых коэффициентов диффузии представляют собой монотонные функции. Максимальные значения КСКТ отвечают минимально проводящим свойствам слоя инженерного барьера. Отметим, что поведение кривых на рис. 3 является монотонно убывающим с ростом значений  $D_a$ . При разной толщине инженерного барьера скорости убывания изменяются по модулю по различным законам. Однако, для условия максимально проводящего барьера значения КСКТ уже не зависят от толщины инженерной защиты и становятся равным 1,04.

Представленные на рис. 2 и 3 кривые и значения КСКТ, приведенные в табл. 1 и 2, имеют монотонный характер изменения, что отмечалось выше. Совершенно другой характер поведения коэффициентов снижения концентрации обнаруживается при анализе зависимости этого параметра от значений наблюдаемых коэффициентов диффузии при вариации толщины инженерного барьера. На рис. 4 именно такая ситуация представлена для комбинаций наблюдаемых коэффициентов диффузии ( $D^1_{aj}D^2_{a4}D^3_{a4}$ ,  $j=1,5$ ), т.е. фиксировались значения наблюдаемых коэффициентов диффузии 2-й и 3-й зон системы, но варьировались значения  $D_a$  для 1-й зоны.

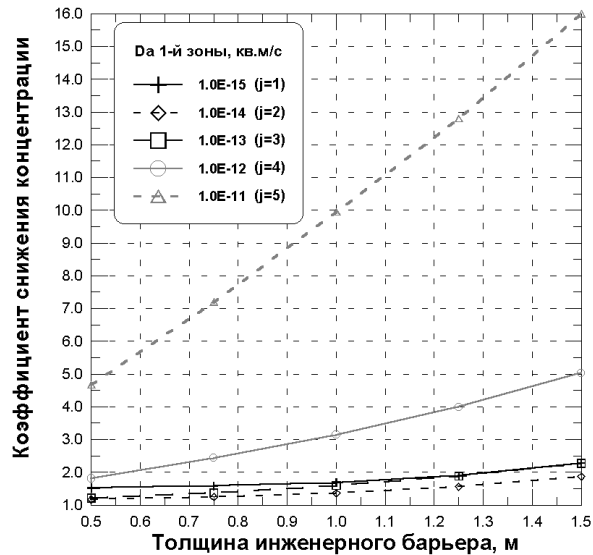


Рис. 2. Зависимость КСКТ от толщины инженерного барьера для пяти комбинаций наблюдаемых коэффициентов диффузии ( $D^1_j D^2_3 D^3_3, j=1,5$ )

Можно отметить несимметричность кривых и наличие явно выраженных минимумов в значениях КСКТ при всех вариантах толщин инженерных барьеров для значения наблюдаемого коэффициента диффузии 1-й зоны системы равном  $10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с (см. рис. 4). Качественно та же самая картина поведения кривых наблюдается и при других рассмотренных в исследовании значениях наблюдаемых коэффициентов диффузии во 2-й и 3-й зонах системы.

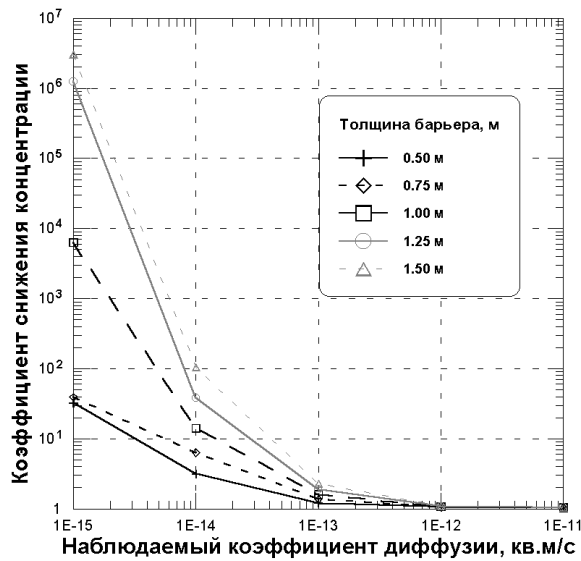


Рис. 3. Зависимость КСКТ от значений наблюдаемых коэффициентов диффузии при вариации толщины инженерного барьера (комбинация  $(D^1_{a3}D^2_{aj}D^3_{a3}, j=1,5)$ )

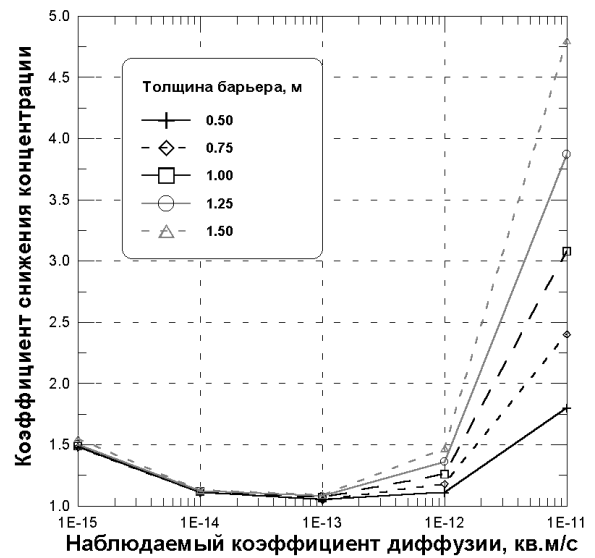


Рис. 4. Зависимость КСКТ от значений наблюдаемых коэффициентов диффузии при вариации толщины инженерного барьера (комбинация  $(D^1_{aj}D^2_{a4}D^3_{a4}, j=1,5)$ )

### 3. Заключение

Выполнен анализ коэффициентов снижения концентрации стабильного трассера в материалах инженерных барьеров в большом диапазоне значений наблюдаемых коэффициентов диффузии ( $10^{-15}$  –  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с). Рассмотрена система, состоящая из 3-х зон. Толщина двух последних варьировалась в диапазоне 1 м с шагом 0,25 м при условии сохранения полного размера системы.

Определен диапазон изменения КСКТ во всем интервале проанализированных значений наблюдаемого коэффициента диффузии и вариантов толщины защитного барьера. Отмечены особенности поведения коэффициентов снижения концентрации в зависимости от толщины инженерного барьера и значений наблюдаемого коэффициента диффузии 1-й и 2-й зон системы. Наилучшие защитные свойства барьера при его фиксированной толщине прогнозируются для условия "высокопроводящей" 1-й зоны системы. Для всех вариантов толщин инженерных барьеров для значения наблюдаемого коэффициента диффузии 1-й зоны системы равном  $10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с обнаруживается явно выраженный минимум в значениях КСКТ.

### Литература

- Амосов П.В., Наумов А.В., Новожилова Н.В. Минимизация радиационного воздействия на население при подземном захоронении не подлежащего переработке отработавшего ядерного топлива в кристаллических породах Кольского полуострова (1 этап). *Апатиты, КНЦ РАН, "СЕВЕР-2003: Проблемы и решения"*, с.55-64, 2004.
- Амосов П.В., Наумов А.В., Новожилова Н.В. Исследование диффузионного переноса долгоживущих радионуклидов в инженерных барьерах объектов долговременного хранения отработавшего ядерного топлива и захоронения радиоактивных отходов. *Вестник МГТУ*, т.10, № 4, с.511-518, 2007.