

УДК 539.163 : 502.175

## Результаты численного моделирования загрязнения подземной гидросферы при нулевом распределении напора на выходных границах

**П.В. Амосов**

*Горный институт КНЦ РАН; Физико-энергетический факультет  
Кольского филиала ПетрГУ, кафедра теплофизики*

**Аннотация.** Представлены результаты исследований влияния ориентации модуля с опасными отходами относительно произвольного направления потока подземных вод на уровень загрязнения подземной гидросферы при нулевом граничном условии напора на выходных границах. Численные эксперименты по расчетам пространственного распределения гидравлического напора и долгоживущего радиоактивного трассера выполнены с помощью программы PORFLOW.

**Abstract.** There have been presented the study results of influence of module with hazardous wastes orientation in relation to arbitrary direction of underground water flow on underground hydrosphere contamination level at zero boundary conditions of head at output boundaries. Numerical experiments on calculations of spatial distribution of hydraulic head and long-lived radioactive tracer have been made with the PORFLOW program.

**Ключевые слова:** направление потока подземных вод, ориентация модуля, загрязнение подземной гидросферы, численные эксперименты

**Key words:** underground water flow direction, module orientation and size, underground hydrosphere contamination, numerical experiments

### 1. Введение

В своих предыдущих работах автор, исследуя (методами численного моделирования (конечные разности) на базе компьютерного кода PORFLOW (*Runchal, 1997*)) процессы загрязнения подземной гидросферы при эксплуатации радиационно опасных объектов, рассматривал ситуации, когда направление потока подземных вод (ПВ) по отношению к модулю захоронения было двух типов: поперечно-продольное (*Амосов, Новожилова, 2008*) и угол  $\varphi$  между направлением потока ПВ и стенками модуля принимает некоторое промежуточное положение от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , при этом условие нулевого напора приписывается верхнему-правому узлу расчетной сетки (*Амосов, 2010*).

В принципе, для второй ситуации возможен и другой тип граничного условия. В частности, автору показалось весьма полезным рассмотреть вариант, когда условие нулевого напора приписывается не одной точке, а выходным границам области моделирования. Физически такой тип условий может соответствовать наличию на границах площадки размещения объекта с отходами геологических нарушений.

Как и в предыдущей работе (*Амосов, 2010*), в такой ситуации численные эксперименты выполняются на фиксированной расчетной сетке, но требуется аккуратное задание гидравлического напора на входных границах рассматриваемой области.

### 2. Предмет исследования

Как и прежде (*Амосов, 2010*), предмет исследования – степень влияния ориентации модуля с отходами относительно направления потока ПВ на уровень загрязнения подземной гидросферы. Показатели загрязнения: пространственное загрязнение; уровень загрязнения в точках контроля; скорость высвобождения загрязнения из области изоляции отходов.

### 3. Теоретические основы и постановка задачи

Нестационарное уравнение фильтрации в гетерогенном неизотропном водоносном горизонте имеет следующий вид (*Runchal, 1997*):

$$\partial[k_{ii}(\partial H/\partial x_i)]/\partial x_i = S_s(\partial H/\partial t) - Q,$$

где  $k_{ii}$  – диагональные компоненты тензора гидравлической проводимости, [м/с];  $x_i$  – пространственные координаты, [м];  $t$  – время, [с];  $H(x,y)$  – пространственное распределение гидравлического давления в исследуемой области, рассчитываемое по классической модели пьезопроводности с учетом зависимости плотности воды и пористости минерального скелета породы от давления, [м];  $Q$  – объемный расход на

единицу объема водоносного горизонта источника или стока,  $[(\text{м}^3/\text{с})/\text{м}^3]$ ;  $S_s$  – коэффициент упругости,  $[\text{м}^{-1}]$ .

Модель исследуемого водоносного горизонта в декартовой системе координат представляет собой прямоугольную площадку размерами  $L_x \times L_y$ ,  $[\text{м}]$  (рис. 1). Тогда, если зафиксировать направление потока ПВ по отношению, например, к горизонтальной оси  $x$  под углом  $\varphi$  и значение градиента гидравлического напора  $i$ ,  $[\text{м}/\text{м}]$  на площадке, то, принимая за нулевую отметку пьезометрического напора выходные границы области моделирования  $H(x, L_y)=0$  и  $H(L_x, y)=0$ ,  $[\text{м}]$ , несложно определить значения напоров на входных границах модели. В принципе, аналогичный подход без проблем переносится и на трехмерные модели.

С учетом принятых обозначений входные граничные распределения напоров в гидродинамической задаче при произвольных значениях  $L_x$  и  $L_y$  могут быть записаны следующим образом:

$$\varphi < \arctg(L_y/L_x), Y_0 = L_y - L_x \cdot \text{tg}(\varphi);$$

$$H(0, y) = i L_x / \cos(\varphi), 0 \leq y < Y_0;$$

$$H(0, y) = i (L_y - y) / \sin(\varphi), Y_0 \leq y \leq L_y;$$

$$H(x, 0) = i (L_x - x) / \cos(\varphi), 0 \leq x \leq L_x.$$

$$\varphi = \arctg(L_y/L_x);$$

$$H(0, y) = i (L_y - y) / \sin(\varphi), 0 \leq y \leq L_y;$$

$$H(x, 0) = i (L_x - x) / \cos(\varphi), 0 \leq x \leq L_x.$$

$$\varphi > \arctg(L_y/L_x), X_0 = L_x - L_y \cdot \text{tg}(\varphi);$$

$$H(0, y) = i (L_y - y) / \sin(\varphi), 0 \leq y \leq L_y;$$

$$H(x, 0) = i L_x / \sin(\varphi), 0 \leq x < X_0;$$

$$H(x, 0) = i (L_x - x) / \cos(\varphi), X_0 \leq x \leq L_x.$$

Расчет по цифровой гидрогеологической модели продолжается до достижения условия стационарного состояния, при котором рассчитанные значения гидравлического напора и скорости потока в каждом расчетном узле остаются постоянными во времени. Далее моделируется процесс распространения загрязнения, которое, по предположению, не изменяет структуры скоростного потока ПВ на площадке.

Уравнение, описывающее перенос радионуклидов (без цепочек распада) в водонасыщенной пористой среде с учетом основных механизмов переноса и физико-химических процессов, влияющих на этот перенос, имеет вид (Runchal, 1997)

$$\partial(RC)/\partial t + \partial(V_i C)/\partial x_i = \partial[D^*_{ij}(\partial C/\partial x_j)]/\partial x_i + S_C - \lambda RC,$$

где  $C$  – концентрация изотопа  $[\text{Бк}/\text{м}^3]$ ;  $\lambda$  – постоянная распада радионуклида  $[\text{с}^{-1}]$ ;  $R$  – фактор задержки изотопа  $[-]$ , который вычисляется через выражение  $R=1+\rho_b K_d/\varepsilon$ , где  $\rho_b$  и  $\varepsilon$  – насыпная плотность  $[\text{кг}/\text{м}^3]$  и пористость  $[-]$  сухого материала,  $K_d$  – коэффициент распределения радионуклида в приближении линейной сорбции  $[\text{м}^3/\text{кг}]$ ;  $D^*_{ij}$  – эффективный коэффициент диффузии (дисперсии)  $[\text{м}^2/\text{с}]$ ;  $V_i$  – компоненты скорости Дарси, которые с учетом малости эффекта плавучести вычисляются по известному соотношению  $V_i = -k_{ij}(\partial H/\partial x_j)$   $[\text{м}/\text{с}]$ ;  $S_C$  – источниковый член для радионуклида  $[\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})]$ .

В качестве начального условия для анализируемого радионуклида ( $^{129}\text{I}$ ), в силу его высокой растворимости, использовалась модель мгновенного растворения –  $C(S_w)=C_0$ . Для этой ситуации источниковый член в управляющем уравнении переноса равен нулю. Для области вмещающего массива начальная концентрация принималась равной нулю, т.е.  $C(S_{rock})=0$ .

Граничные условия для концентрации растворенной примеси, соответствующие выбранному сценарию эволюции объекта, выбранной геометрии и традиционному выбору направления осей  $x$  и  $y$ , тривиальные:  $C|_{x=0}=0$  и  $C|_{x=L_x}=0$ ,  $C|_{y=0}=0$  и  $C|_{y=L_y}=0$  (условие Дирихле).

Для проверки предложенной математической модели рассмотрена плоская площадка квадратной формы с размерами  $100 \times 100$   $[\text{м}]$  (рис. 1). Зафиксирован модуль градиента гидравлического напора, равный  $0,01$   $[\text{м}/\text{м}]$ . Численные эксперименты выполнены для пяти значений угла  $\varphi$  между направлением потока ПВ и горизонтальной осью  $OX$ : 1)  $15^\circ$ , 2)  $30^\circ$ , 3)  $45^\circ$ , 4)  $60^\circ$ , 5)  $75^\circ$ .

Временной интервал численных расчетов процесса распространения загрязнения выбран равным 10 тысяч лет, а полная активность источника ( $^{129}\text{I}$ ), приходящаяся на единицу высоты модуля квадратной



Рис. 1. Схематичное изображение модели площадки и модуля с отходами

формы (10×10 м), составляла  $3 \cdot 10^9$  Бк. Коэффициент распределения этого несорбирующегося в породе мигранта в материале источника принят равным  $0,064 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Численные значения гидродинамических параметров материала модуля и вмещающего массива, необходимых для выполнения численных экспериментов с помощью программы PORFLOW, приведены в таблице. Значение коэффициента упругоэластичности принято равным 0, [ $\text{м}^{-1}$ ].

Таблица. Гидродинамические параметры материалов области источника и вмещающей породы

Параметры	Область источника	Вмещающая порода
Пористость $\varepsilon$ , (-)	0,01	0,005
Плотность $\rho_{с2}$ ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )	2000	2650
Коэффициенты фильтрации $k_x=k_y$ , м/с	$10^{-10}$	$10^{-8}$

#### 4. Результаты расчетов и их анализ

Для выполнения анализа результатов расчетов были построены пространственные распределения гидравлических напоров и загрязнений подземной гидросферы на площадке, а также картины скоростных полей при различных значениях угла  $\varphi$ . Как оказалось, наблюдается определенная симметрия в полученных изображениях относительно диагонали квадрата, соответствующей углу  $\varphi=45^\circ$ . Поэтому в статье приводятся распределения обозначенных параметров для трех значений угла:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$ . Указанный выше факт симметрии находит свое яркое подтверждение при анализе результатов расчетов процесса загрязнения подземной гидросферы как для динамики концентрации трассера в точках контроля, так и для динамики скорости высвобождения активности из объема модуля.

В качестве примера на рис. 2а-в изображены поля скорости, а на рис. 2г-е изолинии напоров для трех вариантов: №1, №2 и №3, т.е.  $\varphi=15^\circ$ ,  $\varphi=30^\circ$  и  $\varphi=45^\circ$ . Обращает на себя внимание отсутствие параллельности в положении изолиний напоров, что отмечалось автором для модели с нулевым напором в единственной точке границы модели (Амосов, 2010). При рассматриваемом граничном условии определенное нарушение плавности изолиний напора отмечается только в центральной части площадки, что связано с очевидной причиной: коэффициент фильтрации материала модуля с отходами на два порядка ниже соответствующего коэффициента вмещающего насыщенного водой массива. Кроме того, отметим появление заметного количества векторов скорости, направленных перпендикулярно выходным границам модели.

На рис. 3 (а-г) приведены результаты пространственного загрязнения гидросферы площадки для вариантов №1, №2 и №3. Другие рассмотренные варианты ( $\varphi=60^\circ$ ,  $\varphi=75^\circ$ ) абсолютно симметричны относительно диагонали, т.е. вариантам №2 и №1, соответственно. На рис. 3 представлены два уровня изолиний: минимальный соответствует уровню вмешательства (УВ) –  $1300 \text{ Бк}/\text{м}^3$ , а максимальный определяется отношением предела годового поступления анализируемого изотопа к величине годового потребления воды и пищи –  $7260 \text{ Бк}/\text{м}^3$  (Нормы..., 1999).

Анализ площади загрязнения выше указанных уровней показывает, что для рассматриваемого момента времени различие в площадях загрязнения имеется, но оно не столь принципиально, как это было в модели с нулевым напором в единственной точке (Амосов, 2010). Строго говоря, в цепочке вариантов №1-№2-№3 наблюдается рост площади загрязнения, что особенно отчетливо видно для изолинии с максимальным значением концентрации. Однако этот рост не принципиален. А для изолинии со значением УВ различия практически нет. Вместе с тем отметим, что максимальная площадь загрязнения для квадратной формы модуля прогнозируется для условия, когда направление потока ПВ и стенки модуля с отходами составляет  $45^\circ$ . В соответствии со структурой скоростного поля прогнозируются более размытые вдоль выходных границ модели области загрязнения.

Для последующего анализа использованы точки контроля, расположенные в верхней-правой четверти моделируемой области (рис. 4). Поскольку относительно диагонали этого квадрата имеется симметрия по гидравлическому напору и пространственному загрязнению, то для выбранного расположения точек контроля симметрия также должна сохраняться. Указанный факт нашел свое подтверждение при анализе графического представления результатов в форме максимальных концентраций загрязнения (рис. 5). Сравнение поведения указанных кривых подтверждает полную симметрию результатов относительно диагонали квадрата. Кроме того, выполненный анализ указывал на аккуратность выполненных вычислений и обработки результатов.

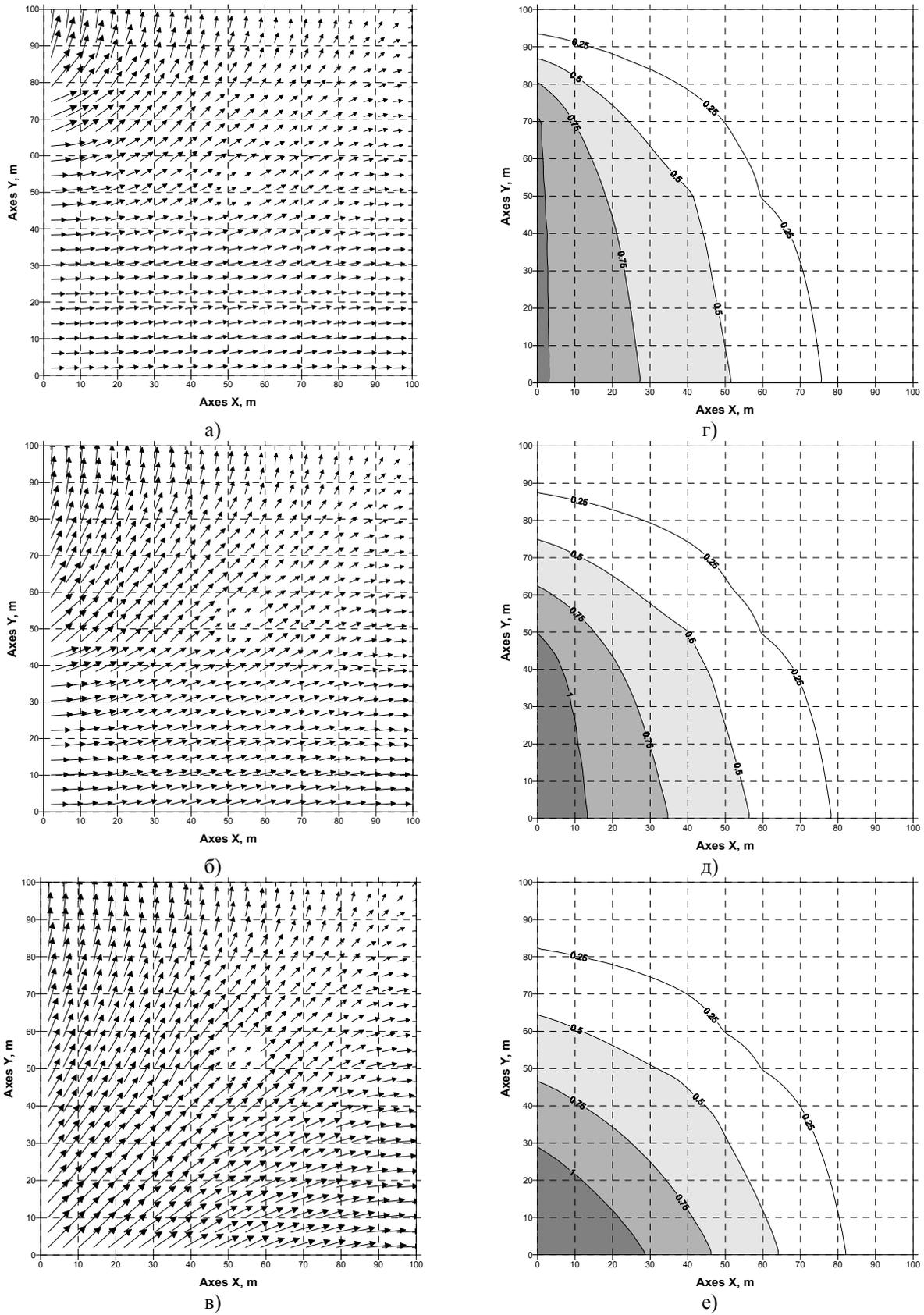


Рис. 2. Поля скорости (а-в) и изолинии напоров (г-е) для вариантов №1-№3

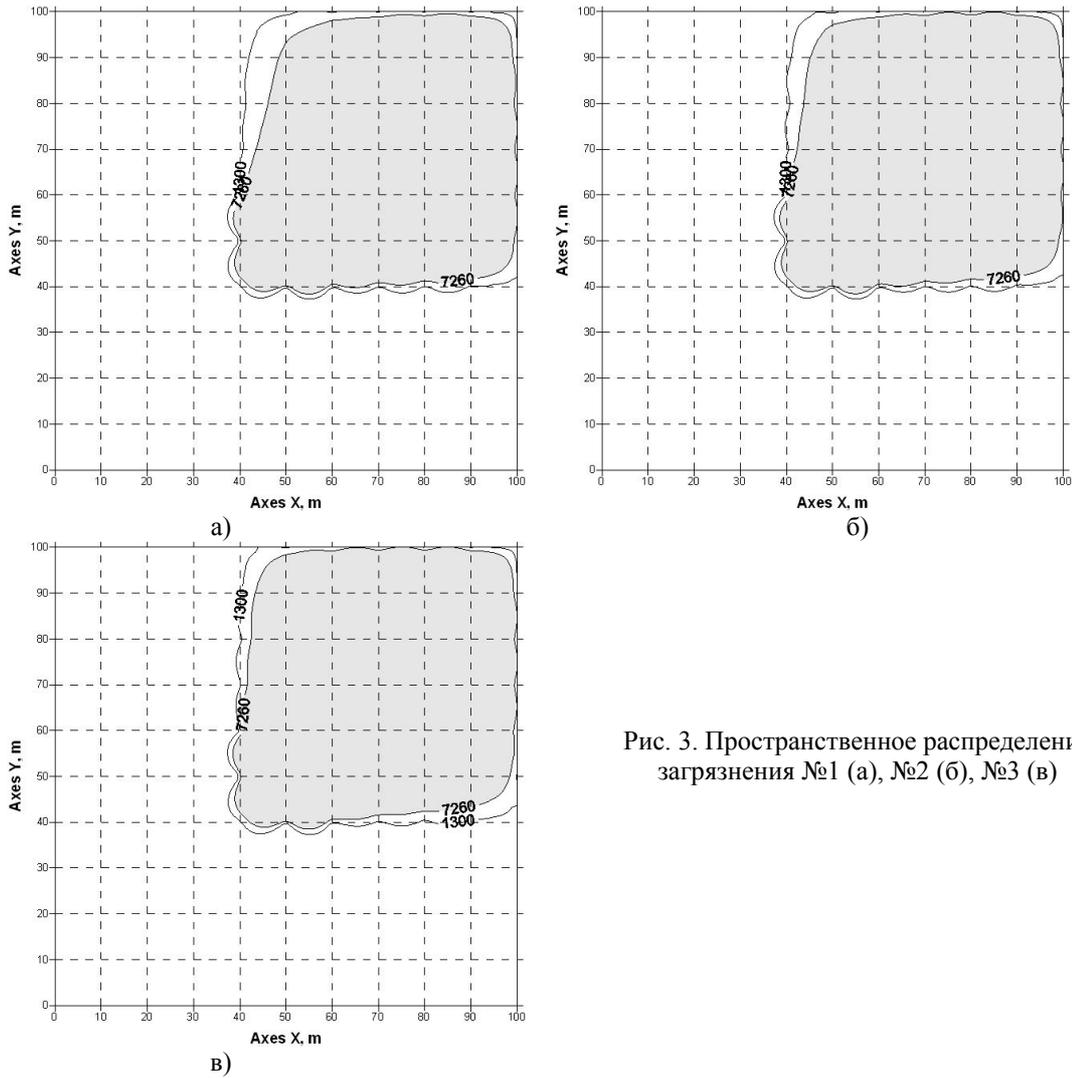


Рис. 3. Пространственное распределение загрязнения №1 (а), №2 (б), №3 (в)

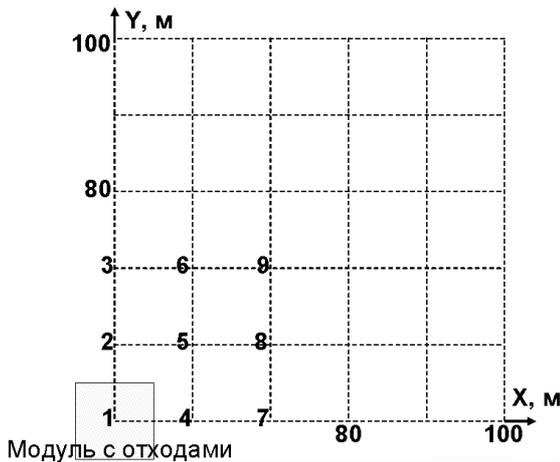


Рис. 4. Расположение точек контроля в верхнем-правом квадранте модели площадки

Анализ поведения представленных кривых показывает физичность результатов. Максимальный уровень концентрации соответствует точке контроля 1 (область источника). При этом имеется определенная зависимость концентрации в этой точке при вариации направления потока ПВ. В частности, минимум концентрации в этой точке контроля отвечает варианту №3, т.е.  $\varphi=45^\circ$ . Напомним, что именно для этого варианта площадь загрязнения оказывается наибольшей. Абсолютная симметричность относительно диагонали квадранта в значениях концентрации соответствует точкам контроля 5 и 9. Поскольку расстояние от источника до точки 9 больше, чем для точки 5, то и уровень загрязнения для более удаленной точки будет ниже. Антисимметричное поведение кривых (в полном соответствии с расположением точек контроля по отношению к модулю с отходами и направлением потока ПВ) наблюдается для следующих пар точек контроля: 2-4, 3-7 и 6-8.

Рис. 5. Максимальная концентрация загрязнения в точках контроля при вариации угла наклона потока ПВ к модулю с отходами

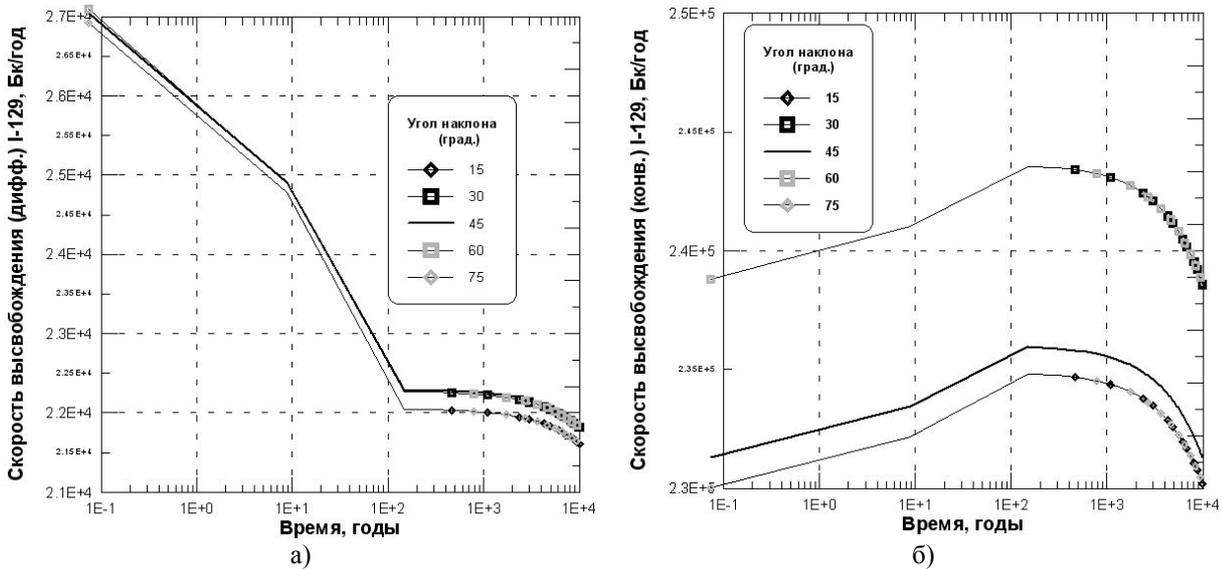
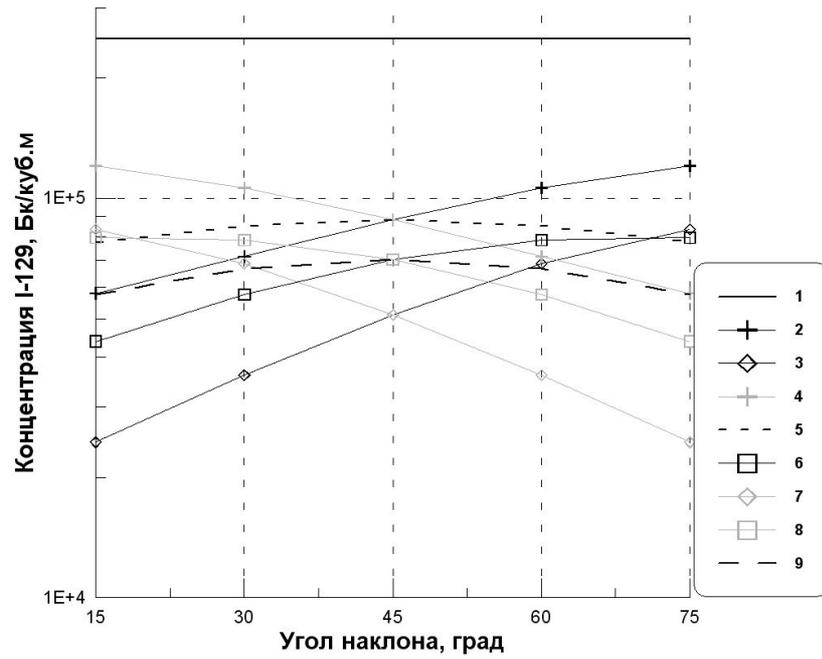


Рис. 6. Динамика скорости высвобождения загрязнения из модуля с отходами при вариации угла наклона потока ПВ: а) диффузионная и б) конвективная составляющие

Динамика скорости высвобождения загрязнения из области изоляции отходов при вариации угла наклона потока ПВ по отношению к стенке модуля представлена на рис. 6. При этом диффузионная составляющая отображена на рис. 6а, а конвективная – на рис. 6б. Отметим несколько моментов:

конвективная составляющая скорости высвобождения существенно выше, чем диффузионная. При этом кривые диффузионной составляющей представляют собой убывающие функции, в то время как поведение кривых конвективной составляющей более сложное: сначала (~ 150 лет) скорость высвобождения растет, а затем падает;

наблюдается яркая симметрия, отмеченная ранее по вариантам угла наклона (№1-№5, №2-№4), что приводит к совмещению построенных кривых;

наибольшие скорости высвобождения загрязнения во вмещающий массив отвечают вариантам №2 и №4, что не совпадает с выводом работы для другого граничного условия (Амосов, 2010). Минимальная же скорость высвобождения посредством обоих анализируемых механизмов отвечает вариантам №1 и №5.

## 5. Выводы

Представлены математическая модель процесса загрязнения подземной гидросферы на площадке изоляции опасных отходов для условия, когда угол  $\varphi$  между направлением потока ПВ и стенками модуля принимает произвольное значение от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . При этом на выходных границах моделируемой области использовано условие нулевого напора. Приведены аналитические выражения распределения гидравлического напора на входных границах площадки, позволяющие с помощью программы PORFLOW получать пространственное распределение напоров и скоростных полей при фиксированном модуле градиента гидравлического напора.

Проанализированы показатели загрязнения подземной гидросферы при вариации угла наклона направления потока ПВ. В частности, для квадратного модуля с отходами продемонстрированы потенциальные площади загрязнения. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что хотя максимальная площадь загрязнения имеет место при угле наклона  $45^\circ$ , вместе с тем, площади загрязнения при других углах наклона принципиально отличаются от максимального значения. Указанный факт подтвержден анализом уровней загрязнения в точках контроля, в т.ч. и в области источника, а также поведением кривых скорости высвобождения загрязнения из модуля с отходами.

## Литература

- Runchal A.** PORFLOW a software tool for multiphase fluid flow, heat and mass transport in fractured porous media. *User's manual (version 3.07)*, 326 p., 1997.
- Амосов П.В.** К вопросу о влиянии ориентации модуля с опасными отходами на загрязнение подземной гидросферы. *Вестник МГТУ*, т.13, № 4/2, с.881-886, 2010.
- Амосов П.В., Новожилова Н.В.** Радиогеоэкология: моделирование эволюции подземного объекта – долговременного хранилища радиационно-опасных материалов (связанного с наличием конвективного потока подземных вод через инженерные барьеры). *Инженерная экология*, № 2, с.28-42, 2008.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). М., Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава РФ, 116 с., 1999.