

## ПРИМЕНЕНИЕ ОТКАЧИВАЮЩИХ СКВАЖИН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНОГО ПОТОКА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Розроблена чисельна модель розрахунку захисту підземних вод від забруднення у разі використання відкачувальних свердловин. Модель базується на рішенні двувимірного рівняння фільтрації та геоміграції. Наводяться результати обчислювального експерименту.

Разработана численная модель расчета защиты подземных вод от загрязнения путем использования откачивающих скважин. Модель основывается на решении двухмерных уравнений фильтрации и геомиграции. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

A numerical model to calculate the process of ground waters protection from pollution with the use of wells has been proposed. The model is based on the 2-D equations of filtration and admixture transfer. Results of numerical experiment are presented.

Безнапорные, первые от поверхности земли, водоносные горизонты наиболее активно подвержены загрязнению. Интенсивность этих горизонтов в силу техногенных факторов значительно увеличилась в последнее время, в результате чего в горизонтах часто возникают обширные зоны, содержащие примеси принесенные извне. Миграция этих зон с течением времени в подземном потоке приводит не только к дальнейшему увеличению области загрязнения потока, но и к попаданию примесей в колодцы, реки, куда разгружается подземный поток. В этой связи совершенствование методов защиты от загрязнения подземных вод приобретет особую актуальность [1; 3; 5; 6].

Для ликвидации зон загрязнения в подземных водах могут применяться различные средства и весьма часто – откачивающие скважины (ОС) [3]. Однако эффективное применение ОС будет зависеть от выбора их расположения относительно зоны загрязнения, дебита скважин. Поскольку визуально нельзя наблюдать (например в реке) как происходит процесс ликвидации зоны загрязнения в подземном потоке, то весьма важным является вопрос, когда следует приостановить откачку, чтобы, с одной стороны, не тратить бесполезно энергию на работу насосов, а, с другой стороны – обеспечить требуемое уменьшение размеров и интенсивности зоны загрязнения. Целью настоящей работы явилось создание эффективного метода расчета процесса защиты безнапорного водоносного горизонта от изучаемого загрязнения путем применения откачивающих скважин.

Метод расчета базируется на создании численной модели изучаемого процесса. При этом рассматривается решение двух основных задач геомиграции:

1. Плановая безнапорная фильтрация.
2. Миграция примеси в безнапорном подземном потоке.

Решение первой задачи позволяет определить нестационарное поле скорости фильтрации при работе откачивающих скважин, которое используется на втором этапе вычислительного процесса для моделирования переноса примеси в водоносном горизонте.

Разработанный метод расчета адаптирован для решения прикладных задач, поэтому при применении метода используется стандартная гидрогеологическая информация, кроме этого пользователь получает прогнозную информацию в виде, удобном для оперативного анализа и принятия инженерного решения. В частности, при проведении вычислительного эксперимента пользователь получает информацию об изменении размеров зоны загрязнения, концентрации примеси в ней при работе скважин, концентрацию загрязнения в воде, поступающей в каждую скважину и информацию об общей массе загрязнения, удаленного из подземного потока. Это позволяет, с одной стороны, определить эффективность принятой схемы расположения скважин, а с другой стороны – определить время, когда следует прекратить откачку. Информация о концентрации загрязнения в откачиваемой воде дает возможность более эффективно применять очистные средства для обработки воды, поднятой из скважин.

**Математическая модель.** Для моделирования течения в подземном горизонте при работе системы скважин (рис. 1) будем использовать уравнение, описывающее плановое фильтрационное течение безнапорного подземного потока [2]

$$m \frac{\partial h}{\partial t} = kh_{cp} \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \pm \sum W \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

где  $m$  – недостаток насыщения;  $h$  – глубина потока;  $k$  – коэффициент фильтрации;  $W$  – дебит скважины; знак «−» – соответствует откачивающей скважине, а знак «+» – поглощающей;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты расположения скважины.

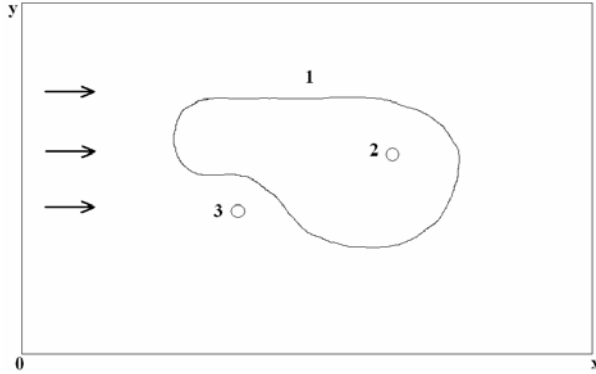


Рис. 1. Схема расположения откачивающих скважин:  
1 – зона загрязнения подземного потока;  
2, 3 – откачивающие скважины

Процесс миграции загрязняющего вещества в подземном потоке описывается уравнением [2; 4]

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \sum WC \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества в подземном потоке;  $u, v$  – компоненты вектора скорости;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент диффузии.

Постановка краевых условий для приведенных уравнений рассмотрена в работе [2].

**Метод решения.** Численное интегрирование уравнений (1) и (2) проводится с использованием попеременно-треугольных неявных разностных схем [2; 4]. Неизвестные значения напора или концентрации рассчитываются по явной формуле бегущего счета. Это позволяет создать эффективный алгоритм расчета в областях сложной геометрической формы. Расчет реализуется на прямоугольной разностной сетке.

Рассмотрим неявную разностную схему расщепления [2], которая положена в основу разработанного алгоритма.

Произведем следующую аппроксимацию производных, входящих в уравнение (2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y};$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i-1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

где

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Следуя работе [2], компоненты скорости потока  $u$  будем задавать на вертикальных гранях разностной ячейки, а компоненты скорости  $v$  – на горизонтальных гранях. Вторые производные аппроксимируем так:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\tilde{\mu}_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-\tilde{\mu}_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

В используемых выражениях  $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-$ ,  $M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$  – обозначения разностных операторов.

С учетом этих обозначений разностный аналог уравнения (2) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + \\ & + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ & = \left( M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} \right). \end{aligned}$$

Решение данного разностного уравнения расщепляется на 4 шага при интегрировании на временном интервале  $dt$ :

- на первом шаге  $k = \frac{1}{4}$ :

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^+ C^k + L_y^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left( M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n \right); \end{aligned}$$

- на втором шаге  $k = n + \frac{1}{2}$ ,  $c = n + \frac{1}{4}$ :

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^- C^k + L_y^- C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left( M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c \right); \end{aligned}$$

- на третьем шаге  $k = n + \frac{3}{4}$ ,  $c = n + \frac{1}{2}$ :

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^+ C^k + L_y^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left( M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c \right); \end{aligned}$$

- на четвертом шаге  $k = n + 1$ ,  $c = n + \frac{3}{4}$ :

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^- C^k + L_y^- C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left( M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k \right). \end{aligned}$$

В данные разностные соотношения входит «возмущенный» коэффициент диффузии  $\tilde{\mu}$  [4].

Преимуществом данной схемы расщепления является то, что на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации загрязняющего вещества определяется по методу бегущего счета. Разностная схема является абсолютно устойчивой на каждом дробном шаге и легко программируется.

В разработанном алгоритме имеется возможность задавать различную геометрическую форму (в плане) области загрязнения зоны, различное количество скважин, их режим работы (время начала и время окончания работы), дебит.

**Практическая реализация.** Разработанная численная модель и созданный на ее основе пакет прикладных программ были применены для решения следующей задачи. Рассматривается безнапорный подземный водоносный горизонт, куда в результате аварии попала серная кислота. Параметры подземного водоносного горизонта следующие: средняя мощность – 28 м; коэффициент фильтрации – 25 м/сут.; поверхностная пористость – 0,3. Образовавшаяся в результате аварийного разлива зона загрязнения характеризуется такими параметрами: максимальная длина зоны – 48 м; максимальная ширина зоны – 48 м; средняя концентрация загрязнения в пятне – 0,09 кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,4$  м<sup>2</sup>/сут. Зона загрязнения имеет сложную геометрическую форму в плане (рис. 1, 2).

Для ликвидации зоны заражения принято решение произвести откачку воды с помощью двух скважин (одна скважина располагается внутри зоны, а другая – на ее границе) с дебитом:  $Q_2 = 300$  м<sup>3</sup>/сут.,  $Q_3 = 350$  м<sup>3</sup>/сут. (на рис. 1 положение скважин отмечено знаком «○»). Размеры расчетной области – 200×168 м. Скважины начинают процесс откачки в момент времени  $t = 0,1$  сут. Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента.

На рис. 2–4 представлены изолинии концентрации серной кислоты в потоке для трех моментов времени:  $t_1 = 0,2$  сут.,  $t_2 = 2,8$  сут. и  $t_3 = 5,5$  сут. Эти рисунки позволяют судить о скорости изменения интенсивности зоны загрязнения после начала работы откачивающих скважин. Сравнивая эти рисунки видим, как «работа» скважин приводит к изменению внутри зоны загрязнения распределения концентрации загрязнения. Так, на рис. 2 ( $t = 0,2$  сут.) зона загрязнения практически однородна и лишь небольшое изменение в ее структуре видно на границах пятна, что обусловлено влиянием процессов «размыва» границы за счет диффузии и конвективного движения.

Структура зоны загрязнения для моментов времени  $t = 2,8$  сут. и  $t = 5,5$  сут. совершенно отлична: хорошо видно, что «работа» скважины, расположенной в центре зоны приводит к постепенному «разрежению» внутри зоны, что обусловлено притоком загрязненной воды к скважине; внешние контуры пятна – продолжают «размываться» и осуществляется подтягивание загрязненных вод ко второй скважине, расположенной на границе зоны.

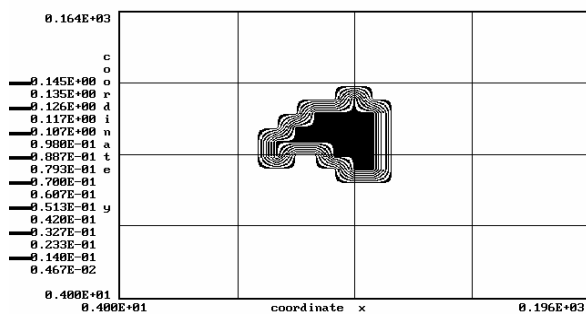


Рис. 2. Зона загрязнения подземного потока для момента времени  $t = 0,2$  сут.

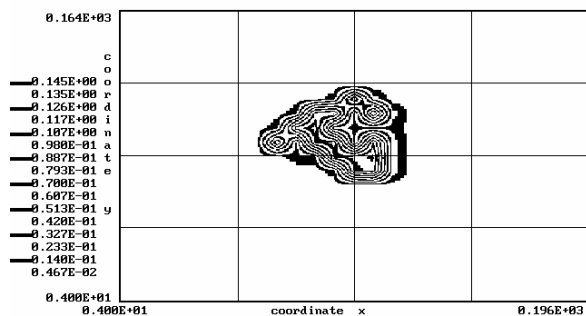


Рис. 3. Зона загрязнения подземного потока для момента времени  $t = 2,8$  сут.

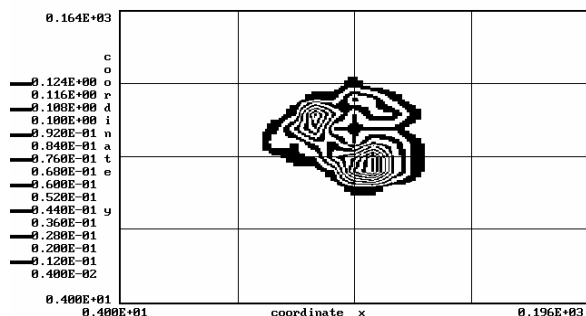


Рис. 4. Зона загрязнения подземного потока для момента времени  $t = 5,5$  сут.

В таблице приведены результаты расчета концентрации кислоты в откачиваемой воде, поступающей в каждую скважину. Здесь также представлена общая масса кислоты, удаленная из зоны загрязнения.

Таблица

**Концентрация серной кислоты в откачиваемой воде, общая масса кислоты, удаленной из подземного потока**

$t$ , сут.	Концентрация в скважине № 2, кг/м <sup>3</sup>	Концентрация в скважине № 3, кг/м <sup>3</sup>	Общая масса удаленной кислоты, кг
0,5	0,12	$0,5 \cdot 10^{-1}$	16
1,5	0,028	0,011	50,3
2,5	0,016	0,008	58,5

Анализируя данные таблицы можно сделать вывод, что откачка загрязненной воды является достаточно медленным процессом.

**Выводы**

Разработана численная модель на основе которой создан метод расчета процесса ликвидации зоны загрязнения, образовавшейся в безнапорном подземном потоке за счет применения откачивающих скважин. Для реализации предложенного метода используется стандартная гидрогеологическая информация. Метод хорошо приспособлен для практических расчетов, требует около 5 с машинного времени на решение одного варианта задачи. Построенный метод может служить инструментом решения широкого класса прогнозных задач, связанных с защитой подземных вод от загрязнения. Дальнейшее совершенствование метода следует осуществлять в направлении его адаптации к процессам фильтрации в неоднородных грунтах.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5-ти книгах / Под ред. Котляревского В. А. и Забегаяева А. В. – М.: Из-во АСВ, 2001.
2. Беляев Н. Н. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод / Н. Н. Беляев, Е. Д. Коренюк, В. К. Хрущ. – Д.: Наука и образование, 2001. – 156 с.
3. Бочеввер Ф. М. Основы гидрогеологических расчетов / Ф. М. Бочеввер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. М. Шестаков. – М.: Недра, 1965. – 305 с.
4. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
5. Полубаринова-Кочина П. Я. Математические методы в вопросах орошения / П. Я. Полубаринова-Кочина, В. Г. Пряжинская, В. Н. Эмих. – М.: Наука, 1969. – 414 с.
6. Ярышкина Л. А. Экологические последствия загрязнения окружающей среды в результате аварий при перевозках неорганических кислот и технологические аспекты их ликвидации / Л. А. Ярышкина, В. Н. Плахотник, А. Н. Бойченко, И. А. Ревина // Ресурсосберегающие технологии в транспорте и гидротехническом строительстве: Межвуз. сб. научных трудов. Новые строительные технологии. – Д.: Арт-Пресс, 1997. – Вып. 3. – С. 103–107.

Поступила в редколлегию 23.02.2006.