

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАЩИТЫ ЗОНЫ АЭРАЦИИ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Розроблена чисельна модель розрахунку захисту зони аерації від забруднення у разі використання нейтралізуючого розчину. Модель базується на рішенні рівнянь геомиграції. Наводяться результати обчислювального та фізичного експериментів.

Разработана численная модель расчета защиты зоны аэрации от загрязнения путем использования нейтрализующего раствора. Модель основывается на решении уравнений геомиграции. Приводятся результаты вычислительного и физического экспериментов.

A numerical model to calculate the process of soil protection from pollution with the use of neutralizator has been proposed. The model is based on the equations of admixture transfer. The results of numerical and physical experiments are presented.

Защита зоны аэрации от загрязнения – важная задача в области экологической безопасности, поскольку загрязнитель из зоны аэрации может с течением времени попасть в подземный водоносный горизонт. Во многих регионах Украины наблюдается высокое стояние грунтовых вод, поэтому опасность их загрязнения за счёт инфильтрации из зоны аэрации крайне высока.

Обзор научных публикаций, посвященных данному вопросу [1, 3, 5, 6], показал, что отсутствуют расчетные методики, которые можно было бы применить для расчета процесса нейтрализации загрязнителя в зоне аэрации.

Целью настоящей работы явилось создание эффективной методики экспресс-расчета процесса нейтрализации загрязнителя в зоне аэрации за счёт подачи нейтрализатора через нагнетательную скважину. Методика расчета базируется на создании численной модели изучаемого процесса.

Разработанная методика расчета адаптирована для решения прикладных задач, поэтому при применении методики используется стандартная гидрогеологическая информация, кроме этого пользователь получает прогнозную информацию в виде, удобном для оперативного анализа и принятия инженерного решения.

Математическая модель

Процесс миграции нейтрализатора в зоне аэрации при подаче через нагнетательную скважину описывается уравнением [2, 4]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (1)$$

где φ – концентрация нейтрализатора, Q – интенсивность поступления нейтрализатора; $\delta(x - x_i)$, $\delta(y - y_i)$, $\delta(z - z_i)$ – дельта-функция Дирака; u, v, w – компоненты вектора скорости; μ – коэффициент дисперсии.

Постановка краевых условий для приведенного уравнения рассмотрена в работе [2].

Для расчёта поля скорости, индуцированного работой скважины, используется модель пространственного источника. Согласно этой модели, скорость течения на расстоянии R от источника (скважины) рассчитывается по формуле

$$V = \frac{Q}{4\pi R^2},$$

где R – расстояние от источника до расчетной точки.

Для учёта вертикального течения жидкости (нейтрализатора) суммируется поле скорости, рассчитанное по данной зависимости, и поле скорости для однородного вертикального потока, равное $w = k/n$ (где k – коэффициент фильтрации, n – пористость).

Нейтрализатор вступает в реакцию с загрязнителем, находящемся в зоне аэрации. Для моделирования этого процесса используется уравнение кинетики, которое представляет собой балансовое соотношение, указывающее, какая масса нейтрализатора необходима для

нейтрализации определенной массы загрязнителя. Процесс взаимодействия «нейтрализатор + загрязнитель» реализован в специальной подпрограмме разработанного пакета программ. Для того чтобы выполнить расчет для различных загрязнителей и различных нейтрализаторов, необходимо внести изменения только в файле исходных данных путем изменения коэффициента, который выражает балансовое соотношение между нейтрализатором и загрязнителем. Поэтому разработанный пакет программ является универсальным, поскольку не требует никакой настройки, доработки при расчете процесса для другого загрязнителя, нейтрализатора.

Метод решения

Расчет уравнения миграции реализуется на прямоугольной разностной сетке. Для расчета используется неявная разностная схема расщепления [2], которая положена в основу разработанного алгоритма.

Преимуществом данной схемы расщепления является то, что на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации вещества определяется по методу бегущего счета. Разностная схема является абсолютно устойчивой на каждом дробном шаге и легко программируется. В разработанной численной модели имеется возможность задавать любое количество скважин, их расположение в зоне аэрации, дебит скважин. В численной модели имеется возможность задавать любую форму зоны загрязнения в зоне аэрации, также можно задавать неравномерное распределение концентрации загрязнителя в зоне.

Результаты физических экспериментов

В данной работе представляются результаты двух физических экспериментов. Первый эксперимент – это моделирование процесса нейтрализации 20 %-ного раствора серной кислоты в грунте путем подачи через нагнетательную скважину 20 %-ного раствора Na_2CO_3 . Схема установки показана на рис. 1.

Уравнение кинетики в данном случае имело вид: $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

Первоначально на грунт была подана кислота, которая, профильтровавшись, создала область загрязнения. Затем через скважину (металлическая перфорированная труба), расположенную в центре зоны разлива, начал подаваться нейтрализатор. Сбоку от зоны разлива располагались две перфорированные емкости,

которые выполняли роль коллекторов, обеспечивающих прием жидкости из грунта при работе скважины. На фотографиях показаны зоны, где выделялся из грунта газ, образующийся в результате реакции. На рис. 4 изображен левый коллектор. Отчетливо видно, что в нем собралась жидкость, поступившая из грунта при проведении процесса нейтрализации.

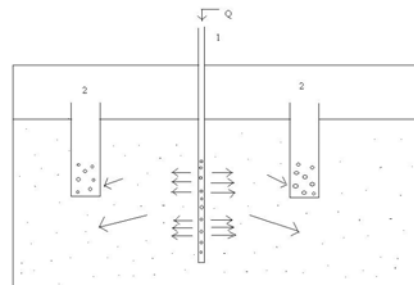


Рис. 1. Схема подачи нейтрализатора через напорную скважину в зону загрязнения (по бокам расположены приемные коллектора)

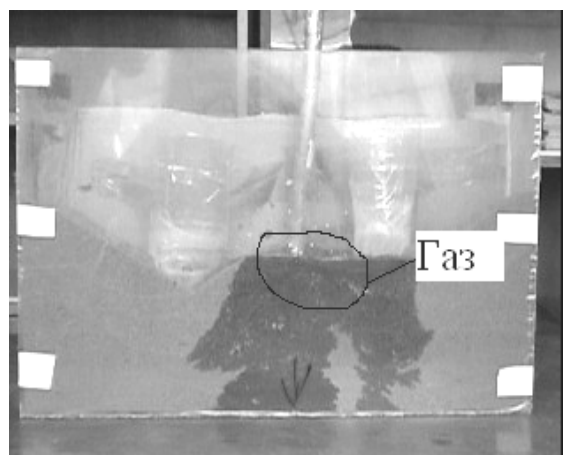


Рис. 2. Подача нейтрализатора в грунт через скважину, $t = 2$ с

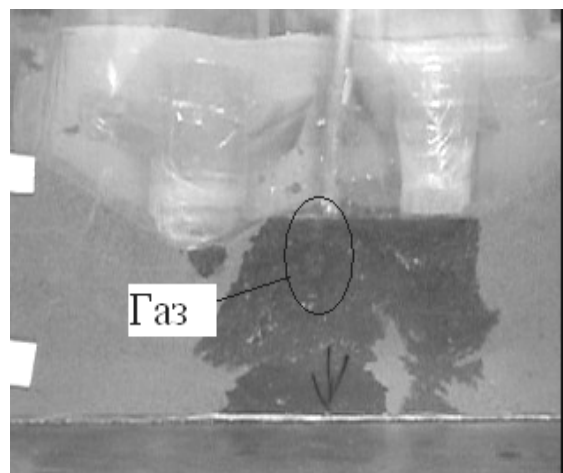


Рис. 3. Подача нейтрализатора в грунт через скважину, $t = 2$ с

На втором этапе был проведен натурный эксперимент по методу Нестерова с целью определения коэффициента фильтрации грунта при фильтрации через него воды, 10 %-ного раствора серной кислоты, а также фильтрации 10 %-ного раствора NaOH в шурф, куда предварительно был подан 10 %-ный раствор серной кислоты. Грунт имел следующую структуру: поверхностно-растительный слой заканчивался на отметке 0,5 м; легкий суглинок заканчивался на отметке 2,1 м; супесь – на отметке 4,9 м, далее шли подземные воды. В табл. 1 представлены опытные данные по измерению расхода воды, фильтрующейся через грунт по методу Нестерова [6].



Рис. 4. Жидкость, собранная в коллекторе, после начала нейтрализации, $t = 80$ с

Таблица 1

| Величина расхода воды для различных моментов опыта | |
|--|----------------------------|
| t , мин | Q , см ³ /мин |
| 60 | 47 |
| 100 | 41 |
| 150 | 37 |
| 270 | 33 |
| 330 | 31 |
| 390 | 30 |

В табл. 2 представлены данные по изменению расхода щелочи, фильтрующейся через грунт. Видно уменьшение величины расхода по сравнению с вариантом, когда фильтровалась вода.

Таблица 2

| Величина расхода раствора серной кислоты для различных моментов опыта | |
|---|----------------------------|
| t , мин | Q , см ³ /мин |
| 60 | 44 |
| 100 | 37 |
| 150 | 34 |
| 270 | 28 |
| 330 | 26 |
| 390 | 26 |

При проведении третьей проливки первоначально в шурф, по методу Нестерова, поступал раствор серной кислоты. Через сутки в этот же шурф стал поступать раствор щелочи. Изменение величины фильтрующегося расхода щелочи показано в табл. 3.

Таблица 3

| Величина расхода раствора NaOH для различных моментов опыта (щелочь фильтруется после раствора кислоты) | |
|---|----------------------------|
| t , мин | Q , см ³ /мин |
| 60 | 41 |
| 100 | 35 |
| 150 | 30 |
| 270 | 20 |
| 330 | 16 |
| 390 | 16 |

Расчет коэффициента фильтрации для каждой проливки определялся по формуле

$$K = \frac{Q}{F} \frac{l}{l + h_1 + h_k},$$

где h_1 – высота в цилиндре (10 см);

h_k – высота капиллярного поднятия;

Q – величина фильтрующегося расхода после установления;

F – площадь фильтрации;

l – глубина промачивания.

Так, при подаче воды величина коэффициента фильтрации, рассчитанная по данной зависимости, составила

$$K_{\text{вода}} = \frac{30}{490} \cdot \frac{150}{150 + 10 + 50} = 0,046 \text{ см/мин.}$$

Величина коэффициента фильтрации при

подаче раствора щелочи составила

$$K_{\text{NaOH}} = 0,038 \text{ см/мин.}$$

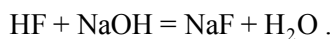
Величина коэффициента фильтрации при подаче раствора щелочи после подачи раствора серной кислоты составила – 0,02 см/мин.

Практическая реализация

Практическое применение разработанной численной модели рассмотрено на следующем примере.

Произошёл аварийный разлив кислоты HF, в результате которого в зоне аэрации образовалась область загрязнения. В области загрязнения находится примерно 76 т кислоты. Для нейтрализации кислоты подаётся раствор NaOH. Нейтрализатор поступает в зону загрязнения через скважину, интенсивность подачи – 5 л/с.

Процесс нейтрализации описывался следующим уравнением кинетики:



На рис. 4, 5 показана область загрязнения в грунте после начала подачи нейтрализатора через нагнетательную скважину. Из рисунков видно положение скважины, возле которой начинает формироваться «чистая» подзона. Хорошо видно, что нагнетательная скважина расположена ближе к правой границе области загрязнения. Динамика нейтрализации кислоты в грунте отчетливо видна из данной таблицы:

| | |
|----------------------|-----------------------|
| $t = 440 \text{ с}$ | $M = 109 \text{ кг};$ |
| $t = 660 \text{ с}$ | $M = 164 \text{ кг};$ |
| $t = 880 \text{ с}$ | $M = 219 \text{ кг};$ |
| $t = 1320 \text{ с}$ | $M = 328 \text{ кг};$ |
| $t = 1540 \text{ с}$ | $M = 383 \text{ кг};$ |
| $t = 2240 \text{ с}$ | $M = 558 \text{ кг}.$ |

Таким образом, с помощью разработанной численной модели имеется возможность проанализировать и оценить эффективность нейтрализации загрязнителя в зоне аэрации для конкретных параметров грунта и параметров, характеризующих работу нагнетательной скважины, подающей нейтрализатор (размещение скважины в области загрязнения, ее дебит, режим работы). Отметим, что в разработанной численной модели имеется возможность задавать различное количество нагнетательных скважин и их различное размещение в зоне аэрации. Это дает возможность исследователю методом вычислительного эксперимента осуществить расчет серии вариантов организации

подачи нейтрализатора в область загрязнения и выбрать оптимальный.

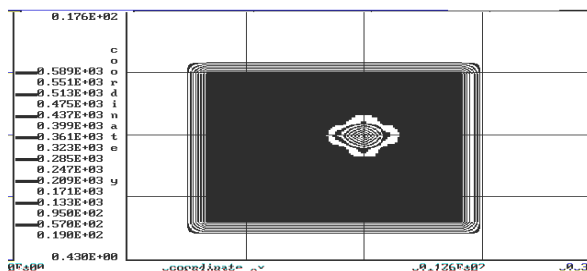


Рис. 5. Зона загрязнения при работе нагнетательной скважины, подающей нейтрализатор, $t = 270 \text{ с}$

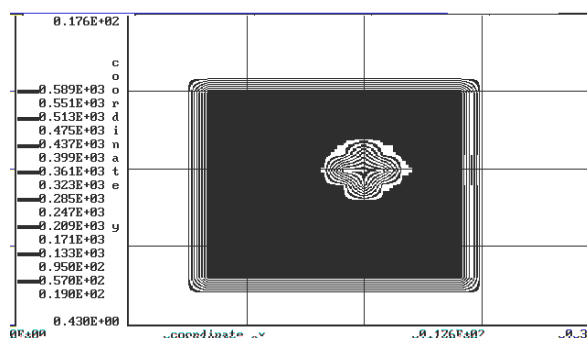


Рис. 6. Зона загрязнения при работе нагнетательной скважины, подающей нейтрализатор, $t = 870 \text{ с}$

Выводы

Разработана численная модель, на основе которой создан метод расчета процесса нейтрализации области загрязнения, образовавшейся в зоне аэрации. Для реализации предложенного метода используется стандартная гидрогеологическая информация. Метод хорошо приспособлен для практических расчетов, требует около 25 с машинного времени на решение одного варианта задачи. Модель может быть использована для обоснования принятых инженерных решений по защите зоны аэрации и подземных вод. 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: Учеб. пособие в 5 кн. [Текст] / под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: АСВ, 2001.
2. Беляев, Н. Н. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. Д. Коренюк, В. К. Хрущ. – Д.: Наука и образование, 2001. – 156 с.

3. Основы гидрогеологических расчетов [Текст] / под ред. Ф. М. Бочевера. – М.: Недра, 1965. – 305 с.
4. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / под ред. М. З. Згуровского. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
5. Полубаринова-Кочина, П. Я. Математические методы в вопросах орошения [Текст] / П. Я. Полубаринова-Кочина, В. Г. Пряжинская, В. Н. Эмих. – М.: Наука, 1969. – 414 с.
6. Скоболланович, И. А. Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод [Текст] / И. А. Скоболланович. – М., Недра, 1954. – 388 с.
7. Экологические последствия загрязнения окружающей среды в результате аварий при перевозках неорганических кислот и технологические аспекты их ликвидации [Текст] / Л. А. Ярышкина и др. // Ресурсосберегающие технологии в транспорте и гидротехническом строительстве: Межвуз. сб. науч. тр. «Новые строительные технологии». – Вып. 3. – Д.: Арт-Пресс, 1997. – С. 103-107.

Поступила в редколлегию 25.06.2008.