

И. В. КАЛАШНИКОВ (ДИИТ)

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРАЛИЗУЮЩИХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ОБЛАСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ И В ПОДЗЕМНОМ ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

Розроблено ефективний метод розрахунку процесу нейтралізації зони аерації та підземного водоносного горизонту нейтралізуючим розчином, який подається на поверхню ґрунту. Метод базується на побудові чисельної моделі процесу геоміграції. Розрахунок здійснюється з використанням неявної поперемінно-трикутничкової різницевої схеми.

Разработан эффективный метод расчета процесса нейтрализации зоны аэрации и подземного водоносного горизонта за счет подачи нейтрализующего раствора на поверхность ґрунта. Метод основан на построении численной модели процесса геомиграции. Расчет выполняется с использованием неявной поперемінно-треугольной разностной схемы.

An effective method to calculate the process of neutralization of soil and underground waters when the neutralizer is supplied to the surface of the soil. The method proposed is based on the numerical model of admixture transfer process. The implicit change-triangle difference scheme is used for calculation.

Анализ последствий аварий на производстве, транспорте [1; 6] показывает, что неорганизованные (аварийные) разливы на ґрунт способны вызывать интенсивное долговременное загрязнение как зоны аэрации под местом разлива, так и подземного водоносного горизонта. В этой связи особую важность приобретает разработка мероприятий по ликвидации зон загрязнения в ґрунте, подземных водах. Ввиду высокого подъема уровня безнапорных вод по многих регионах Украины, процесс поступления загрязнения с поверхности земли через зону аэрации в подземный поток может начаться достаточно быстро после аварии, что делает задачу по нейтрализации образовавшихся зон загрязнения особо актуальной.

При малой мощности зоны аэрации наиболее доступным и легкоорганизуемым средством защиты ґрунта и подземных вод от загрязнения после аварийных разливов является подача на поверхность земли воды или нейтрализующих растворов. Для этого организуется обвалование загрязненного участка с последующей подачей на него жидкости. Обзор литературы по данному вопросу показал отсутствие четких рекомендаций, расчетных методов, позволяющих для конкретных гидрогеологических условий научно-обоснованно выбрать параметры промывки и оптимизировать данный процесс. Приводимые в литературе параметры промывки носят рекомендательный характер и не привязаны к конкретному типу ґрунта. Не указывается также методика, на основе которой эти параметры были получены.

Целью данной работы явилась разработка метода расчета процесса нейтрализации областей загрязнения в зоне аэрации и в подземном потоке под участком аварийного разлива. Построенный метод основывается на создании математической модели процесса с последующей ее численной реализацией.

Будем считать, что произошел аварийный разлив серной кислоты. Ввиду задержки аварийно-спасательных команд часть кислоты успела с поверхности ґрунта профильтроваться через зону аэрации и пошла в безнапорный подземный поток (рис. 1). Таким образом, в результате аварии произошло загрязнение как зоны аэрации, так и водоносного горизонта. Для ликвидации этих зон принимается решение по подаче нейтрализующего раствора на поверхность пораженного участка с целью нейтрализации остатков кислоты в ґрунте (зона аэрации *A*, рис. 1) с последующей нейтрализацией загрязненного участка в подземном потоке, сформировавшегося под зоной аварийного разлива. Требуется изучить динамику процесса нейтрализации при выбранных параметрах промывки и известных гидрогеологических данных.

На первом этапе построения модели рассматриваемого процесса проведем схематизацию расчетной области, разбив ее на две подзоны – зону аэрации *A* и зону подземного потока, где образовалось пятно кислоты в потоке – *B* (рис. 1). Для каждой подзоны построим математическую модель.

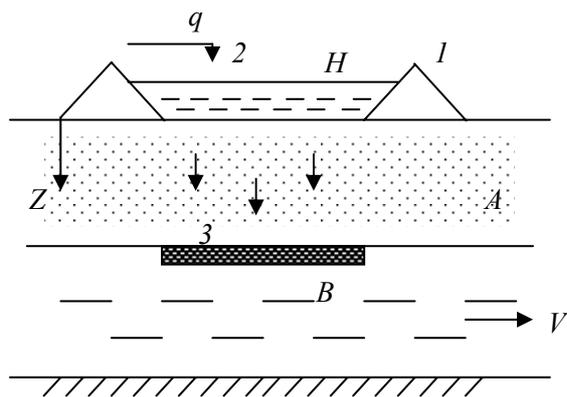


Рис. 1. Схема расчетной области  
 1 – ограждающие валики; 2 – подача нейтрализатора на пораженный участок; 3 – область загрязнения в подземном потоке; A – зона аэрации; B – зона безнапорного подземного потока

**Модель нейтрализации области загрязнения в зоне аэрации.** Пусть на пораженный участок грунта (рис. 1) осуществляется подача нейтрализующего раствора интенсивностью  $q$ . Зона аэрации грунта, где необходимо на первом этапе ликвидировать область загрязнения, образовавшуюся за счет попадания кислоты в тупиковые поры, сорбции, характеризуется коэффициентом фильтрации  $K$  и недостатком насыщения  $S$ . В случае неоднородного грунта будем использовать величину обобщенного коэффициента фильтрации, определяемого по формуле Г. Н. Каменского [3]

$$K_0 = \frac{m}{\sum_i \frac{m_i}{k_i}},$$

где  $m$  – мощность зоны аэрации;  $m_i$  – мощность  $i$ -го слоя грунта в зоне аэрации, имеющего коэффициент фильтрации  $k_i$ .

Отметим, что в модели необходимо использовать коэффициент фильтрации  $K$  для используемой жидкости (нейтрализующего раствора). Это значение можно рассчитать следующим образом:

$$K = K_B \frac{v_B}{v},$$

где  $K_B$  – коэффициент фильтрации воды через грунт;  $v_B$ ,  $v$  – коэффициенты вязкости для воды и нейтрализующего раствора.

Для эффективной промывки необходимо, чтобы выполнялось условие  $q > K$ , т. е. чтобы имела место фильтрация в насыщенный грунт.

Процесс миграции нейтрализующего раствора будем моделировать следующими уравнениями фильтрации и геомиграции:

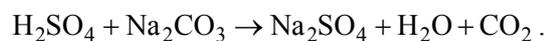
$$S \frac{dZ}{dt} = K \frac{H(t) + Z}{Z}; \quad (1)$$

$$n \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где  $S$  – недостаток насыщения;  $Z$  – глубина смачивания грунта;  $H$  – уровень нейтрализующего раствора на поверхности земли;  $n$  – поверхностная пористость;  $u$  – скорость фильтрации;  $\mu$  – коэффициент диффузии;  $\varphi$  – концентрация нейтрализатора в фильтрующемся растворе. Из решения уравнения фильтрации (1) можно определить скорость фильтрации раствора [5]

$$u = \frac{K(1-S)}{2S} + \sqrt{\frac{K^2(1-S^2)}{4K^2} + \frac{Kq}{S} \left( \mu \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)}. \quad (3)$$

Зная скорость  $u$ , можно перейти к расчету процесса миграции нейтрализующего раствора через зону аэрации. Для этого численно интегрируется уравнение (2) с помощью попеременно-треугольной неявной разностной схемы [2]. Процесс взаимодействия нейтрализатора и кислоты на каждом временном шаге рассчитывается исходя из уравнения кинетики, например, так



Описанная модель представлена в разработанном пакете прикладных программ в виде отдельного блока «FILTR-1». В результате работы этого блока пользователь получает информацию о скорости фильтрации раствора нейтрализованной кислоты и количестве нейтрализатора, который, пройдя через зону аэрации  $A$ , начинает поступать в зону  $B$  – зону загрязненного подземного потока.

**Модель нейтрализации области загрязнения в подземном потоке.** Процесс миграции кислоты, нейтрализатора в безнапорном потоке будем описывать моделью градиентного типа

$$n \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где  $\varphi$  – концентрация кислоты (нейтрализатора);  $u$ ,  $v$  – компоненты вектора скорости безнапорного фильтрационного потока. Для моделирования процесса поступления нейтрализатора в количестве  $Q$  в область  $B$  из зоны аэрации в уравнение (4) включено слагаемое вида

$$Q\delta(x-x_i)\delta(y-y_i),$$

где  $\delta(x-x_i)$ ,  $\delta(y-y_i)$  – дельта-функции Дирака;  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты «точек» поступления нейтрализатора.

Краевые условия для приведенных моделей рассмотрены в работе [2].

Численное интегрирование уравнения геомиграции (4) проводится также с использованием попеременно-треугольной неявной разностной схемы [2].

Программная реализация этого этапа оформлена в виде блока «FILTER-2». В результате работы данного блока пользователь получает информацию о динамике миграции пятна кислоты в подземном потоке, нейтрализатора и скорости процесса нейтрализации.

Разработанный на базе построенной модели пакет прикладных программ был использован для решения следующей задачи. В результате разлива серной кислоты на грунт произошло загрязнение зоны аэрации под участком разлива, в результате которого в подземном потоке образовалась зона загрязнения. Для ликвидации зоны загрязнения в подземном потоке и в зоне аэрации была осуществлена подача на поверхность грунта 10-процентного раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Гидрогеологические параметры таковы: коэффициент фильтрации в зоне аэрации – 2,2 м/сут; недостаток насыщения – 0,3; мощность зоны аэрации – 2,2 м; скорость фильтрации подземного водоносного горизонта – 0,3 м/сут; средняя глубина водоносного горизонта – 10 м; средняя концентрация кислоты в зоне аэрации – 12 кг/м<sup>3</sup>; а в зоне загрязнения подземного потока – 10 кг/м<sup>3</sup>. Интенсивность подачи нейтрализатора на грунт (на 1 м<sup>2</sup>) – 2,4 м/сут. Коэффициент диффузии при миграции в зоне аэрации полагается равным нулю, а в области движения безнапорного потока

$$\mu = 0,1V,$$

где  $V$  – скорость фильтрации.

Перейдем к рассмотрению результатов моделирования. В табл. 1 представлены результаты расчета глубины промачивания нейтрализующим раствором зоны аэрации, а также уровень нейтрализующего раствора на поверхности земли.

Таблица 1

**Расчетные значения глубины промачивания грунта  $Z$  и уровня нейтрализующего раствора  $H$  на поверхности земли**

$t$ , сут	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$Z$ , м	0,37	0,74	1,12	1,49	1,87	2,2
$H$ , м	$0,77 \cdot 10^{-2}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$	$0,23 \cdot 10^{-1}$	$0,30 \cdot 10^{-1}$	$0,38 \cdot 10^{-1}$	$0,46 \cdot 10^{-1}$

Из табл. 1 видно, что потребуется около 7 часов для прохождения нейтрализующим раствором зоны аэрации. Также видно, что при выбранной интенсивности подачи на грунт нейтрализатора на поверхности земли образуется слой толщиной около 4 см, который легко поддерживать устройством ограждающих валиков. Более наглядно процесс нейтрализации кислоты в зоне аэрации виден из анализа табл. 2, 3.

Таблица 2

**Расчетные значения концентрации кислоты в грунте через 120 мин после начала подачи нейтрализатора**

$Z$ , м	0,6	1	1,6	1,82	2,14
Концентрация кислоты в грунте, кг/м <sup>3</sup>	0	9,4	12	12	12

Таблица 3

**Расчетные значения концентрации кислоты в грунте через 240 мин после начала подачи нейтрализатора**

$Z$ , м	0,6	1	1,6	1,82	2,14
Концентрация кислоты в грунте, кг/м <sup>3</sup>	0	0	5,5	11,9	12

При практическом применении метода промывки грунта нейтрализующими растворами весьма важно знать не только динамику ликвидации зоны загрязнения (см. табл. 2, 3), но также динамику поступления нейтрализующего раствора в подземный водоносный горизонт, расположенный под местом аварии. Результаты решения этой задачи представлены в табл. 4, где показано какое количество  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  поступило в подземный водоносный горизонт (на 1 м<sup>2</sup>) с момента начала процесса нейтрализации кислоты в зоне аэрации.

На втором этапе осуществлялся расчет процесса нейтрализации пятна кислоты в подземном потоке за счет фильтрации нейтрализующего раствора, поступающего из зоны аэрации. При этом использовались результаты моделирования предыдущего этапа, т. е. этапа нейтрализации кислоты в зоне аэрации, и в частности результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4

**Количество нейтрализатора, поступившего в подземный водоносный горизонт после начала промывки зоны аэрации**

$t$ , мин	360	420	480	540
Масса $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , кг	1,14	12,42	32,83	58,11

На рис. 2 показана исходная форма пятна кислоты, сформировавшегося под местом аварии, максимальная длина пятна – 42 м, а максимальная ширина – 36 м. Нейтрализатор поступает на данное пятно сверху, интенсивность поступления его рассчитывается в модели.

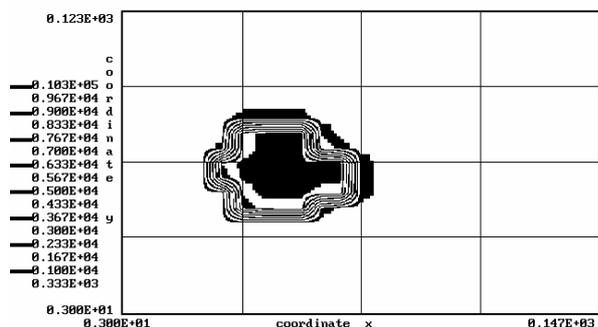


Рис. 2. Область загрязнения подземного потока через  $t = 0,5$  сут после начала нейтрализации

На рис. 3, 4 показано как изменяются размеры зоны загрязнения при нейтрализации. Хорошо видно, что под действием движения подземного потока исходная область загрязнения вытягивается и выходит за границы обрабатываемого участка.

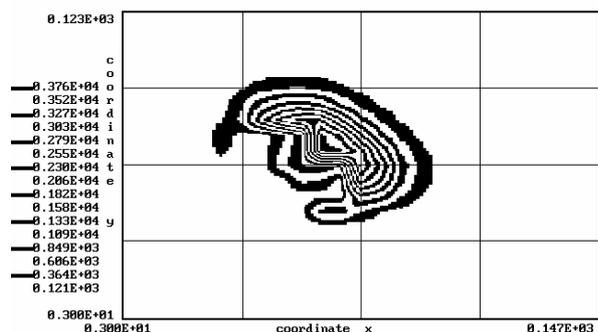


Рис. 3. Область загрязнения подземного потока через  $t = 6$  сут после начала нейтрализации

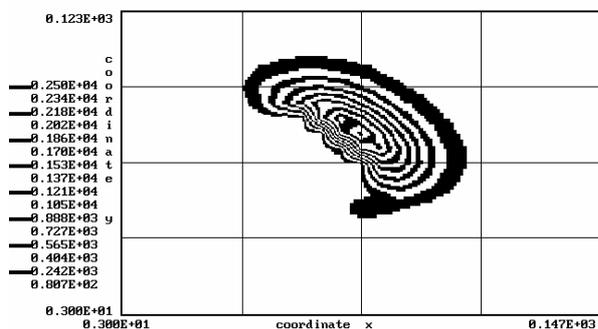


Рис. 4. Область загрязнения подземного потока через  $t = 10$  сут после начала нейтрализации

В табл. 5 представлены расчетные данные по изменению максимальной концентрации кислоты в подземном потоке после начала ней-

трализации. Отметим, что нейтрализатор начал поступать из зоны аэрации в подземный поток через 7 ч после начала промывки и максимальное значение концентрации кислоты в потоке составляло  $10 \text{ кг/м}^3$ .

Таблица 5

**Изменение максимального значения концентрации кислоты в подземном водоносном горизонте после начала нейтрализации**

$t$ , сут	0,75	4,75	9,75	10,75	11,75
Максимальная концентрация кислоты в потоке, $\text{кг/м}^3$	9,62	7,49	5,90	5,68	5,55

Как видно из табл. 5, снижение интенсивности загрязнения подземного потока происходит достаточно медленно.

### Выводы

В настоящей работе разработан эффективный метод расчета процесса нейтрализации области загрязнения, образовавшейся в зоне аэрации и в подземном водоносном горизонте под участком аварийного разлива. Метод хорошо приспособлен для практических расчетов, требует малых затрат машинного времени (время расчета 3...5 с), для расчета используется стандартная гидрогеологическая информация.

Применение разработанного метода для моделирования рассматриваемого процесса позволяет сформулировать ряд рекомендаций:

1. Аварийно-спасательные бригады или другие технические службы, обеспечивающие проведение работ по нейтрализации, должны быть обеспечены приборами для экспресс определения гидрогеологических параметров грунта зоны аэрации, водоносного горизонта на месте аварийного разлива.

2. Процесс нейтрализации области загрязнения в зоне аэрации и в подземном водоносном горизонте за счет подачи нейтрализатора на поверхность грунта является достаточно медленным и требует достаточно большого количества нейтрализующего раствора; необходимое время нейтрализации может быть определено на основе предложенного в работе метода.

3. Для эффективной нейтрализации необходимо обеспечить фильтрацию нейтрализующего раствора по типу «насыщенной» фильтрации.

Дальнейшее развитие данной работы следует вести в направлении создания банка данных по различным типам загрязнителей и нейтрализующих растворов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5-ти кн. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – 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. Бочевер Ф. М. Основы гидрогеологических расчетов / Ф. М. Бочевер, 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.: Наукова 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 // Межвузовский сборник научных трудов: Ресурсосберегающие технологии в транспорте и гидротехническом строительстве. Новые строительные технологии. – Д.: Арт-пресс, 1997. – Вып. 3. – С. 103–107.

Поступила в редколлегию 04.11.2005.