

**Т. В. БОЙКО, Ю. А. ЗАПОРОЖЕЦ**

### **АНАЛИЗ РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Представлен анализ работ исследования процессов фильтрации в грунтовом слое. Проведена систематизация информации по геологическим и гидрогеологическим свойствам территорий Украины. В следствие территория разделена по основным схемам геофильтрации на четыре области и внутри них девять районов. Выделен ряд проблем государственного значения связаны с движением жидкостей и газа в пористых средах и следствий негативного влияния промышленности на состояние грунтового слоя и в следствие грунтовых вод. К таким проблемам относятся: водоснабжение; добыча энергетического сырья (нефти и газа); проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических и гидромелиоративных сооружений; борьба с загрязнениями засолением грунтовыми водами сельскохозяйственных площадей и т.д.

Решение таких проблем требует разработки теории фильтрационных процессов в моделях пористых сред. Реализация моделей фильтрации загрязняющих веществ в грунтах позволит получить объективное представление о процессе распространения загрязненных жидкостей в глубоководных горизонтах.

Выделено, что химические реакции взаимодействия потока и пористой среды имеют свое влияние на дисперсию. Рассмотрена модель фильтрационного процесса с необратимой химической реакцией первого порядка  $A \rightarrow B$  и получена зависимость коэффициента дисперсии от константы скорости реакции. Было математически доказано, что включение в процесс переноса примесей фильтрационным потоком дополнительного фактора - химического взаимодействия - приводит к ослаблению дисперсии. А также выделено, что для использования математического моделирования фильтрационного процесса с учетом химического взаимодействия более высокого порядка реакции нужно учитывать большее количество информации, над которой еще нужно работать. Также была проведена оценка уровня экологического риска химического влияния на грунт. Для этого была представлена шкала классификация уровня риска изменения состояния окружающей среды.

**Ключевые слова:** фильтрация, почвенный слой, грунтовые воды, математическое моделирование, массообмен, кинетические уравнения, загрязняющие вещества, риск.

**Т. В. БОЙКО, Ю. А. ЗАПОРОЖЕЦ**

### **АНАЛІЗ РИЗИКУ ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТУ ПРОМИСЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

Представлений анализ работ исследования процессов фильтрации в грунтовом слое. Проведена систематизация информации за геологическими и гидрогеологическими свойствами территорий Украины. В следствие территория разделена за основными схемами геофильтрации на четыре области и в середине них девять районов. Выделено ряд проблем государственного значения пов'язани з рухом рідин і газу в пористих середовищах і наслідків негативного впливу промисловості на стан грунтового шару, а також стан грунтових вод. До таких проблем відносяться: водопостачання; видобуток енергетичної сировини (нафти і газу); проектування, будівництво та експлуатація гідротехнічних та гідромеліоративних споруд; боротьба з забрудненням засоленням грунтовими водами сільськогосподарських площ і т.д.

Рішення таких проблем вимагає розробки теорії фільтраційних процесів в моделях пористих середовищ. Реалізація моделей фільтрації забруднюючих речовин в грунтах дозволить отримати об'єктивне уявлення про процес поширення забруднених рідин в глибокозалегаючих горизонтах.

Виділено, що хімічні реакції взаємодії потоку і пористого середовища мають свій вплив на дисперсію. Розглянуто модель фільтраційного процесу з незворотною хімічною реакцією першого порядку  $A \rightarrow B$  і отримана залежність коефіцієнта дисперсії від константи швидкості реакції. Було математично доведено, що включення в процес перенесення домішок фільтраційним потоком додатковий фактор - хімічної взаємодії - призводить до ослаблення дисперсії. А також виділено, що для використання математичного моделювання фільтраційного процесу з урахуванням хімічної взаємодії більш високого порядку реакції потрібно враховувати велику кількість інформації, над якою ще потрібно працювати. Також була проведена оцінка рівня екологічного ризику хімічного впливу на грунт. Для цього була представлена шкала класифікація рівня ризику зміни стану навколишнього середовища.

**Ключові слова:** фільтрація, ґрунтовий шар, ґрунтові води, математичне моделювання, массообмен, кінетичні рівняння, забруднюючі речовини, ризик.

**T. V. BOIKO, J.A. ZAPOROZHETS**

### **ANALYSIS OF THE RISK OF SOIL POLLUTION BY INDUSTRIAL OBJECTS**

An analysis of the work of studying filtration processes in the soil layer is presented. The systematization of information on the geological and hydrogeological properties of the territories of Ukraine was carried out. As a result, the territory was divided according to the main geofiltration schemes into four areas and within them nine areas. A number of problems of state importance are identified associated with the movement of liquids and gas in porous media and the consequences of the negative impact of industry on the state of the ground layer and as a consequence of groundwater. Such problems include: water supply; extraction of energy raw materials (oil and gas); design, construction and operation of hydraulic and irrigation and drainage facilities; combating pollution and salinization of agricultural areas with groundwater, etc.

The solution of such problems requires the development of a theory of filtration processes in models of porous media. Implementing models of filtering pollutants in soils will provide an objective picture of the process of distribution of contaminated liquids in deep-seated horizons.

It is emphasized that the chemical reactions of interaction between the flow and the porous medium have their influence on the dispersion. A model of the filtration process with an irreversible first-order chemical reaction  $A \rightarrow B$  is considered, and the dependence of the dispersion coefficient on the reaction rate constant is obtained. It was mathematically proved that the inclusion of an additional factor in the transfer process of impurities by the filtration flow - chemical interaction - leads to a weakening of the dispersion. It was also highlighted that in order to use mathematical modeling of the filtration process, taking into account the chemical interaction of a higher order of reaction, a large amount of information must be taken into account, which still needs to be worked on. An assessment of the level of environmental risk of chemical effects on the soil was also carried out. For this, a scale was presented to classify the level of risk of environmental change.

**Keywords:** filtration, soil layer, groundwater, mathematical modeling, mass transfer, kinetic equations, pollutants, risk.

**Введение.** В последние годы на территории Украины произошли значительные изменения водного режима как в результате действия многолетних циклических природно-климатических факторов, так и в результате воздействия неблагоприятных техноген-

ных условий. Прежде всего, эти изменения коснулись гидродинамического, физико-химического, биохимического и теплового режимов поверхностных и подземных вод, а также состояния и состава почвенного слоя.

© Т. В. Бойко, Ю. А. Запорожец, 2018

Изменение режима грунтовых вод в ряде случаев стимулировало развитие опасных гидрогеологических процессов (подтопление городских и сельских территорий, промышленных площадок и сельскохозяйственных земель, загрязнение грунтовых вод и засоление плодородных почв) и инженерно-геологических процессов (таких как проседание поверхности земли в результате фильтрационной консолидации грунта, а также оползневые процессы, которые провоцируются избыточным увлажнением и подтоплением участков склона). Следует отметить, что развитие перечисленных явлений в густонаселенных районах с высокой концентрацией промышленных объектов может привести к катастрофическим экологическим последствиям, которые могут проявиться в форме быстрых процессов (практически мгновенных разрушений) или в течение длительного периода времени в виде ухудшения качества подземных вод (изменения их состава), ухудшение почвенного слоя влияет на социально-бытовые условия проживания людей и представляет угрозу для их здоровья и жизнь.

**Анализ литературных данных и постановка задачи.** Начиная с первых этапов изучения особенностей движения жидкости в пористой среде, посвящено значительное количество работ. Также за последние десятилетия увеличилось количество работ, которые посвящены изучению и исследованию пористой среды. Большой вклад в систематизацию информации по геологическим и гидрогеологическим свойствам территорий Украины представлено в работах Абрамова И. Б. в которых автор представил разделение территории Украины по основным схемам геофильтрации на четыре области и внутри них девять районов [1].

Целый ряд актуальных проблем государственного значения связаны с движением жидкостей и газа в пористых средах. К таким проблемам относятся: водоснабжение; добыча энергетического сырья (нефти и газа); проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических и гидромелиоративных сооружений; борьба с загрязнением засолением грунтовыми водами сельскохозяйственных площадей и т. д. [2].

Решение таких проблем требует разработки теории фильтрационных процессов в моделях пористых сред, наиболее адекватных природных условий. Процессы фильтрации нефти, газа, воды происходят в пористых средах, которые в зависимости от своих физико-механических свойств относятся к группе изотропных или анизотропных почв. Изотропным называются почвы, фильтрационные свойства которых в каждой точке одинаковые во всех направлениях. Анизотропными же называются почвы, фильтрационные свойства которых в каждой точке различны в разных направлениях. Кроме того, производительные природные пласты, содержащие нефть и газ, проявляют не только изотропные или анизотропные и однородные или неоднородности фильтрационные свойства, но они почти всегда искажены и имеют переменную толщину. Именно поэтому исследования математических моделей двумерной фильтрации в

анизотропных, неоднородных и многослойных средах актуальны. Использование таких моделей позволит получить объективное представление о процессе распространения загрязненных жидкостей в глубоководных горизонтах.

**Моделирование массообмена и макрокинетики химических реакций при фильтрации растворов.** Задачи связанные с химическим составом подземных вод часто встречаются при моделировании процессов нефтеотдачи месторождения нефти с помощью закачки химических реагентов, а также при оценке последствий распространения жидких загрязнителей в подземных водах.

Отличительной особенностью задач, связанных с моделированием миграции подземных флюидов и сопровождающих процессов, является недостаток геологической и геохимической информации, а также тяжелые процессы происходящие в почвенном слое [3, 4].

Для математического моделирования процесса подземного массопереноса, в том числе процесса формирования химического состава подземных вод должна быть известна следующая информация: механизм протекания химических реакций в системе; кинетические коэффициенты каждой реакции; физические и физико-химические свойства пород и фильтрующих растворов [5].

На параметры подземного массообмена (а именно на гидродисперсию) имеют влияние процессы дисперсии примесей в фильтрационном потоке, которые аналогичны турбулентной диффузии. В свою очередь химические реакции взаимодействия потока и пористой среды имеют свое влияние на дисперсию.

В качестве модели пористой среды принимается цепочка ячеек идеального перемешивания. Предполагается, что процессы в разных ячейках независимы друг от друга. Эффект дисперсии определяется результатом прохождения частицей достаточно большого числа ячеек.

В рамках описанных условий рассмотрим математическую модель фильтрационного процесса с необратимой химической реакцией первого порядка:  $A \rightarrow B$ . Эта модель является расширением модели многокомпонентной фильтрации [5]. Отличительной чертой этой модели является замена уравнения материального баланса с учетом свойств и процессов почвенного слоя на уравнение с учетом химической кинетики.

Скорость реакции  $\xi$  описывается уравнением:

$$\xi = -kC, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация реагента (вещества А),  $k$  – константа скорости реакции.

$$C(x, t) = \frac{M_0 e^{-kt}}{V \sqrt{4\pi dt}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Dt}}, \quad (2)$$

где  $M_0$  – начальное количество частиц, введенных в первую ячейку. Физический смысл соотношения (2) следующий: в каждый момент времени примесь распределена по нормальному закону, а множитель  $e^{-kt}$  описывает уменьшение общего числа частиц за счет реакции.

Уравнение конвективной диффузии с учетом химической кинетики:

$$\sigma \frac{\partial c}{\partial t} + U \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) + \xi \quad (3)$$

где  $D$  – коэффициент гидродисперсии,  $U$  – средняя скорость течения в ячейке,  $U = ql / V$ ,  $l$  – длина ячейки. Его решение для случая мгновенного точечного источника в начале координат:

В случае химической реакции первого порядка концентрация частиц, исходящих из  $n$ -й ячейки, изменятся со временем по закону:

$$C(n,t) = \frac{M_0 e^{-kt}}{q \sqrt{2\pi n \sigma^2}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2n\sigma^2}}; \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{V^2}{q+k}^2;$$

$$\bar{t} = \frac{V}{(q+k)},$$

где  $V$  – объем ячейки;  $q$  – объемный поток, который проходит через ячейку,  $\bar{t}$  – среднее время нахождения частицы в ячейке,  $\sigma^2$  – среднеквадратическое отклонение.

$$D = \frac{Ul}{2} \frac{1}{(1+k/q)^2} = \frac{D_0}{(1+k/q)^2}, \quad D_0 = \frac{Ul}{2}. \quad (5)$$

Соотношение (5) показывает, что протекание химической реакции в фильтрующем растворе приводит к уменьшению коэффициента гидродисперсии.

Итак, выше показано, что включение в процесс переноса примесей фильтрационным потоком дополнительного фактора – химического взаимодействия, приводит к ослаблению дисперсии. Физически это означает, что флуктуации, которые вносятся химическими реакциями в поле концентраций, коррелируются с флуктуациями, которые вносятся случайным полем скоростей.

Для использования математического моделирования фильтрационного процесса с учетом химического взаимодействия более высокого порядка реакции требуется большое количество информации, а именно более детальное описание всех процессов взаимодействия между фильтрующим потоком и пористым средой и их физические и химические свойства, описание кинетического уравнения с учетом всех его факторов и свойств.

Для анализа оценивания уровня риска изменения состояния составляющих окружающей среды проводится соответственно до представленной шкалы в табл. 1. [6].

Таблица 1 – классификация уровня риска изменения состояния окружающей среды

| Уровень               | Значение риска      |
|-----------------------|---------------------|
| Неприемлемый          | $> 10^{-6}$         |
| Условно-приемлемый    | $10^{-6} - 10^{-7}$ |
| Приемлемый            | $10^{-7} - 10^{-8}$ |
| Безусловно приемлемый | $< 10^{-8}$         |

На основании полученных значений по модели (1)–(5) принимается решение про уровень экологического риска химического влияния на грунт.

$$R = 6,083 \cdot 10^{-8} \cdot e^{5,48I} \quad (6)$$

где  $I$  – индекс влияния на грунт,  $I = 1 - e^{-e^{0,016 \cdot Zc-1}}$ ,  $Zc = C / Cf$ ,  $Cf$  – фоновая концентрация вещества.

Результат использования представленной математической модели фильтрационного процесса с необратимой химической реакцией первого порядка (1)–(5) представлены в табл. 2. Осуществлялось компьютерное моделирование процесса фильтрации нитратов (с начальной концентрацией  $c_0(0,0,0) = 0,3$  г/л),

Таблица 2 – Изменяется концентрация нитрата в процессе фильтрации в разные моменты времени

| №  | Время фильтрации $t$ | Ось фильтрации |     | Изменение концентрации вещества |       | Изменение скорости фильтрации |        |
|----|----------------------|----------------|-----|---------------------------------|-------|-------------------------------|--------|
|    |                      | $x$            | $y$ | $C_x$                           | $C_y$ | $V_x$                         | $V_y$  |
| 0  | 0                    | 0              | 0   | 0,3                             | 0,3   | 0                             | 0      |
| 1  | 1                    | 1              | 0,5 | 0,273                           | 0,297 | -0,657                        | -0,478 |
| 2  | 2                    | 2              | 1   | 0,275                           | 0,284 | -1,671                        | -0,896 |
| 3  | 3                    | 3              | 1,5 | 0,252                           | 0,248 | -2,385                        | -1,164 |
| 4  | 4                    | 4              | 2   | 0,23                            | 0,212 | -3,099                        | -1,432 |
| 5  | 5                    | 5              | 2,5 | 0,208                           | 0,176 | -3,813                        | -1,7   |
| 6  | 6                    | 6              | 3   | 0,186                           | 0,14  | -4,527                        | -1,967 |
| 7  | 7                    | 7              | 3,5 | 0,164                           | 0,104 | -5,241                        | -2,235 |
| 8  | 8                    | 8              | 4   | 0,142                           | 0,068 | -5,955                        | -2,503 |
| 9  | 9                    | 9              | 4,5 | 0,12                            | 0,032 | -6,669                        | -2,77  |
| 10 | 10                   | 10             | 5   | 0,097                           | 0,004 | -7,383                        | -3,038 |

Анализ полученных результатов показывает, как изменяется концентрация нитрата в процессе фильтрации в разные моменты времени.

В табличке 3 представлен анализ уровня экологического риска химического влияния нитрата на грунт.

Таблица 3 – Изменение риска влияния нитрата на почву

| №  | $t$ | $I$     | $R$                  | Risk               |
|----|-----|---------|----------------------|--------------------|
| 0  | 0   | 0,44817 | $7,09 \cdot 10^{-6}$ | Условно приемлемый |
| 1  | 1   | 0,4466  | $7,03 \cdot 10^{-6}$ | Условно приемлемый |
| 2  | 2   | 0,43982 | $6,77 \cdot 10^{-6}$ | Условно приемлемый |
| 3  | 3   | 0,42135 | $6,12 \cdot 10^{-6}$ | Условно приемлемый |
| 4  | 4   | 0,40336 | $5,55 \cdot 10^{-6}$ | Условно приемлемый |
| 5  | 5   | 0,38586 | $5,04 \cdot 10^{-6}$ | Условно приемлемый |
| 6  | 6   | 0,36887 | $4,59 \cdot 10^{-6}$ | Приемлемый         |
| 7  | 7   | 0,3524  | $4,2 \cdot 10^{-6}$  | Приемлемый         |
| 8  | 8   | 0,33646 | $3,84 \cdot 10^{-6}$ | Приемлемый         |
| 9  | 9   | 0,32105 | $3,53 \cdot 10^{-6}$ | Приемлемый         |
| 10 | 10  | 0,30617 | $3,26 \cdot 10^{-6}$ | Приемлемый         |

Использование предложенной математической модели позволяет проанализировать изменение концентрации нитрата в процессе фильтрации в разные моменты времени.

**Выводы.** В работе рассмотрены факторы, которые влияют на параметры массообмена, а именно на гидродисперсию. Определены данные, необходимые для математического моделирования процесса массопереноса, в том числе процесса формирования химического состава почвенных вод.

Определено, что химические реакции взаимодействия веществ, растворенных в воде и присутствующих в почве существенно влияют на процесс дисперсии. Рассмотрена модель фильтрационного процесса с необратимой химической реакцией первого порядка  $A \rightarrow B$  и получена зависимость коэффициента дисперсии от константы скорости реакции. Было математически доказано, что включение в процесс переноса примесей фильтрационным потоком дополнительного фактора – химического взаимодействия – приводит к ослаблению дисперсии. А также выделено, что для использования математического моделирования фильтрационного процесса с учетом химического взаимодействия более высокого порядка реакции нужно учитывать большее количество факторов, что требует дополнительных исследований. Представлены результаты оценки уровня экологического риска химического влияния на почва.

#### Список литературы.

1. Абрамов И. Б. Оценка воздействия на подземные воды промышленно-городских агломераций [Текст] / И. Б. Абрамов. Харьков, 2007. 285 с.
2. Шестаков, В. М. Гидрогеодинамика [Текст] / В. М. Шестаков. М.: МГУ, 1995. — 368 с.
3. Олійник А. П. Математичне моделювання фільтраційних процесів в задачах оцінки рівня та якості ґрунтових вод [Текст] / А. П. Олійник, Л. О. Штаєр, О. І. Клапоушчак // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2013. № ¼ (61). С. 15–18.
4. Бойко Т. В. Математичне моделювання міграції забруднюючих речовин у ґрунтах [Текст] / Т. В. Бойко, А. О. Абрамова, Ю. А. Запорожець // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2013. № 6/4 (66). С. 14–16. Режим доступу: [\www/URL:http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18711](http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18711).
5. Запорожець Ю. А. Вплив процесу фільтрації на якість ґрунтових вод [Текст] / Ю. А. Запорожець // Збірник наукових статей п'ятої міжнародної науково-практичної конференції. Київ 2016, С. 203–206.
6. Статюха Г. О. Системний підхід до оцінювання ризиків при проектуванні промислових об'єктів / Г. О. Статюха, Т. В. Бойко, А. О. Абрамова // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2012. № 2/14 (56). С. 8–12.

#### References (transliterated)

1. Abramov I. B. Otsenka vozdeistviya na podzemnie vodi promishlenno-horodskyykh ahlomeratsiy [Tekst] / I. B. Abramov. Kharkov, 2007. 285 s.
2. Shestakov V. M. Gidrogeodinyamika [Tekst] / V. M. Shestakov. M.: MGU, 1995. 368 s.
3. Oliinyk, A. P. Matematychnе modeliuvannia filtratsiynykh protsesiv v zadachakh otsinky rivnia ta yakosti gruntovykh vod [Tekst] / A. P. Oliinyk, L. O. Shtaiер, O. I. Klapoushchak // Skhidno-levropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2013. № ¼ (61). S. 15–18.
4. Boiko T. V. Matematychnе modeliuvannia mihratsii zabrudniuchykh rechovyn u gruntakh [Tekst] / T. V. Boiko, A. O. Abramova, J. A. Zaporozhets // Skhidno-levropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2013. № 6/4 (66). S. 14–16. Rezhym dostupu: [\www/URL:http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18711](http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18711).
5. Zaporozhets Yu. A. Vplyv protsesu filtratsii na yakist gruntovykh vod [Tekst] / Yu. A. Zaporozhets // Zbirnyk naukovykh statei p'iatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kyiv 2016, S. 203–206.
6. Statiukha H. O. Systemnyi pidkhid do otsiniuvannia ryzykiv pry proektuvanni promyslovykh obiektiv / H. O. Statiukha, T. V. Boiko, A. O. Abramova // Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2012. №2/14 (56). S. 8–12.

Надійшла (received) 20.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бойко Тетяна Владиславівна (Бойко Татьяна Владиславовна, Bojko Tatyana Vladislavovna)** – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9710-8055>; e-mail: [tvbojko@gmail.com](mailto:tvbojko@gmail.com).

**Запорожець Юлія Анатоліївна (Запорожець Юлия Анатолієвна, Zaporozhets Julia Anatoliyevna)** – асистент кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5052-7036>; e-mail: [z.juli@bigmir.net](mailto:z.juli@bigmir.net).