

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 628.16.067.1:519.87

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, В. В. КОЗАЧИНА², О. Ю. ГУНЬКО³, В. М. КУЗНЕЦОВ⁴,
О. В. ЗВОНАРЬОВА⁵

^{1*}Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

³Кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

⁴Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

⁵Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

Математичне моделювання процесу нейтралізації агресивної домішки у підземних водах: експрес модель

Мета. Одним з сучасних засобів захисту підземних вод при наявності агресивної домішки є використання проникних бар'єрів (reactive barrier). При проведенні проектних робіт важливо заздалегідь визначати ефективність проникних бар'єрів. Для рішення такої складної задачі потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. В роботі розглядається розробка чисельних моделей для розрахунку процесу нейтралізації агресивної домішки в потоці підземних вод за допомогою проникного бар'єру з урахуванням гідродинаміки течії. **Методика.** Гідродинаміка підземних вод описується двовимірним рівнянням (планова модель) фільтрації безнапірного потоку ґрунтових вод. Для моделювання процесу руху агресивної домішки в потоці ґрунтових вод використовується двовимірне рівняння конвективно-дисперсійного поширення забруднювача в безнапірному потоці підземних вод. Для чисельного інтегрування рівняння фільтрації ґрунтових вод використовуються дві кінцево-різницькі схеми розщеплення. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу агресивної домішки використовується схема розщеплення по фізичним процесам. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію розроблених чисельних моделей динаміки ґрунтових вод та масопереносу агресивної домішки. Розроблені комп'ютерні коди є інструментом для оперативного аналізу ефективності використання проникного бар'єру. **Наукова новизна.** Розглянуто рішення комплексної задачі геоміграції – рух агресивної домішки та її нейтралізація у проникному бар'єрі (reactive barrier). Для аналізу ефективності роботи проникного бар'єру розроблено чисельну модель динаміки підземних вод та масопереносу агресивної домішки в ґрунтових водах. На базі розроблених чисельних моделей розроблено комп'ютерні коди для проведення обчислювальних експериментів. Розроблені чисельні моделі дають можливість протягом одного робочого дня здійснити серію розрахунків для наукового обґрунтування параметрів проникного бар'єру. **Практична значимість.** Побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно вирішувати складні задачі в галузі охорони водних ресурсів від забруднення.

Ключові слова: фільтрація; геоміграція забруднення ґрунтових вод; масоперенос; математичне моделювання; проникний бар'єр

Вступ

Стічні води, що потрапляють у підземний потік зі сховищ (ставки-відстійники), можуть бути агресивними та з часом впливати на стійкість фундаменту споруд, підземні комунікації тощо. Таким чином, ймовірними є такі дві ситуації: перша – підтоплення території; друга – міграція агресивних речовин в підземному потоці. Хімічно забруднені ґрунтові води взаємодіють з фундаментами будівель. Інтенсивне забруднення ґрунтових вод також має місце при інфільтрації різного роду домішок в ґрунтові води від промислових майданчиків або при аварійних витоків на транспорті, підприємствах.

Тому, паралельно з задачею зниження рівня ґрунтових вод, виникає задача по захисту ґрунтових вод від хімічного забруднення. Для рішення даної задачі можуть використовуватись різні підходи. З точки зору геоміграції, дана задача відноситься до проблеми масопереносу. Рішення задач масопереносу здійснюється за допомогою чисельних та аналітичних моделей [1–6, 8–13].

Важливим питанням є розробка спеціалізованих моделей для комплексного рішення задач фільтрації та геоміграції.

Мета

Створення математичної моделі для розрахунку процесу нейтралізації агресивної домішки в потоці підземних вод за допомогою промислових бар'єрів.

Методика

Розглядається планова задача фільтрації з урахуванням того, що в підземному водоносному шарі розташований проникний бар'єр. Рух ґрунтових вод описується рівнянням:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

де h – глибина ґрунтових; k – коефіцієнт фільтрації; μ – нестача насичення; h_m – середня глибина підземного потоку.

Компоненти вектору швидкості підземного потоку визначаються на базі закону Дарсі:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \frac{\partial h}{\partial y}. \quad (2)$$

Постановка крайових умов для рівняння (1) розглянута в [7].

Для експрес розрахунку використовується наступне рівняння фільтрації:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Граничні умови для рівняння (3) розглянути в [10].

Чисельна модель. Рішення рівняння (1) базується на методі розщеплення та використанні методу сумарної апроксимації. Різницеви рівняння мають вигляд:

– крок № 1:

$$\frac{h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (4)$$

– крок № 2:

$$\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[a \frac{h_{i+1,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[a \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right], \quad (5)$$

де $a = \frac{kh_m}{\mu}$.

Для практичної реалізації даної чисельної моделі розроблено комп'ютерний код, мова програмування FORTRAN.

Чисельне рішення рівняння (3) базується на використанні локально-одновимірної різницевої схеми. Для цього використовується не саме рівняння (3), а його «еволюційний» вигляд.

Для чисельного інтегрування рівняння фільтрації (3) здійснюється попередній запис його у вигляді нестационарного рівняння:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}. \quad (6)$$

Далі здійснюється розщеплення цього рівняння. Схема розщеплення має вигляд:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}; \quad (7)$$

$$\mu \frac{\partial k}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}. \quad (8)$$

У різнищевому вигляді схема записується так:

– крок № 1:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \frac{h_{i+1,j}^n - h_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

– крок № 2:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Умовою закінчення розрахунку є наступна:

$$|h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

де $\varepsilon = 0,01$.

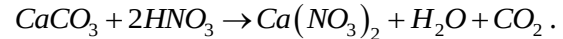
Розрахунок за даною чисельною моделлю здійснюється на базі розробленої комп'ютерної програми, мова програмування FORTRAN.

Модель руху агресивної домішки. Для визначення концентрації агресивної домішки в потоці ґрунтових вод використовується рівняння:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (9)$$

де u, v – компоненти вектора швидкості; C – концентрація агресивної речовини; μ_x, μ_y – відомі коефіцієнти дисперсії; n – порозність; t – час.

Для моделювання процесу локальної нейтралізації підземних вод пропонується використання спеціальних проникних бар'єрів, в яких міститься крейда. Якщо агресивною домішкою в ґрунтових водах є азотна кислота, то рівняння реакції має вигляд:



Для побудови чисельної моделі руху агресивної домішки використовується метод розщеплення. Розщеплення здійснюється за фізичними процесами: процес конвективного руху та процес дисперсії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right);$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0.$$

Перше рівняння цієї системи розв'язується за допомогою схеми сумарної апроксимації:

– крок № 1:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right];$$

– крок № 2:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

Друге рівняння цієї системи – рівняння конвективного переносу, що розв'язується за допомогою змінно-трикутної схеми розщеплення.

Розроблена комп'ютерна програма, що реалізує розрахунок руху агресивної домішки в потоці ґрунтових вод.

Результати

Далі наведено результати обчислювального експерименту по визначенню ефективності використання проникного бар'єру на базі моделі планової фільтрації. Математичне моделювання виконано для таких параметрів: розміри розрахункової області 500×420 м; порозність 0,3;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

коефіцієнт фільтрації 20 м/добу; глибина ґрунтових вод на початку розрахункової області 25 м, глибина ґрунтових вод наприкінці розрахункової області 20 м; нестача насичення 1. Розглядається ситуація, коли в підземному потоці є хмара агресивної домішки (кислота HCl), концентрація домішки в хмарі 140 г/л. Початкова хмара забруднювача має складну геометричну форму. Хмара рухається в область, де планується розташування дренажної свердловини.

Математичне моделювання на базі розроблених чисельних моделей виконано для таких сценаріїв:

1. Рух хмари агресивної домішки в потоці ґрунтових вод при відсутності дренажної свердловини (сценарій № 1).

2. Рух хмари домішки в потоці ґрунтових вод при наявності працюючої дренажної свердловини та проникного бар'єру (сценарій № 2).

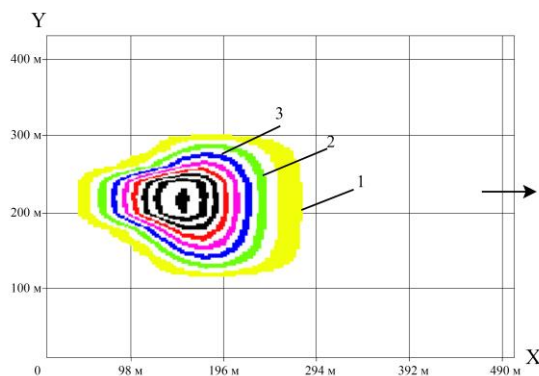


Рис. 1. Ізолії концентрації домішки в потоці ґрунтових вод, $t = 54$ доби (сценарій № 1):
1 – $C = 12,0$ г/м³; 2 – $C = 27,9$ г/м³; 3 – $C = 43,8$ г/м³

Fig. 1. Contour lines of contaminant concentration in the groundwater flow, $t = 54$ days (scenario No. 1):
1 – $C = 12.0$ g/m³; 2 – $C = 27.9$ g/m³; 3 – $C = 43.8$ g/m³

Як можна бачити з наведеного рисунка при відсутності захисного бар'єру, початкова форма області забруднення повільно змінюється: «хмара» витягується в напрямку руху підземного потоку, розміри плями збільшуються внаслідок процесу дисперсії.

Для сценарію № 2 приймалося, що рівень води в свердловині $h = 15$ м, водотрив – горизонтальний. Відзначимо, що в якості внутрішньої граничної умови, для різницевої комірки, де

розташована дренажної свердловини, ставиться умова для концентрації $C = 0$. Фізично це означає, що домішка «не затримується» всередині комірки, а відкачується зі свердловини.

Результати обчислювального експерименту для сценарію № 2 показано нижче на рис. 2.

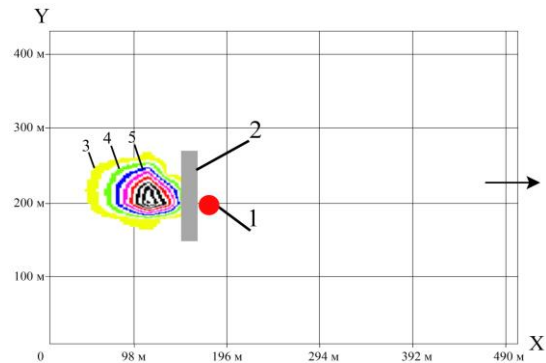


Рис. 2. Ізолії концентрації домішки в потоці ґрунтових вод, $t = 36$ діб (сценарій № 2):
1 – $C = 12,0$ г/м³; 2 – $C = 27,9$ г/м³; 3 – $C = 43,8$ г/м³

Fig. 2. Contour lines of contaminant concentration in the groundwater flow, $t = 36$ days (scenario No. 2):
1 – $C = 12.0$ g/m³; 2 – $C = 27.9$ g/m³; 3 – $C = 43.8$ g/m³

Як можна бачити з рис. 2, використання проникного бар'єру дає можливість захистити дренажну свердловину від потрапляння агресивної домішки.

Слід відзначити, що час розрахунку кожного сценарію на базі розробленої моделі дорівнює 2 с.

Наукова та практична значимість

Розглянуте рішення комплексної задачі геоміграції – рух агресивної домішки та її нейтралізація у проникному бар'єрі (reactive barrier). Для аналізу ефективності роботи проникного бар'єру розроблено чисельну модель динаміки підземних вод та масопереносу агресивної домішки в ґрунтових водах.

На базі побудованих чисельних моделей розроблено комп'ютерні коди для проведення обчислювальних експериментів.

Розроблені чисельні моделі дають можливість протягом одного робочого дня здійснити серію розрахунків для наукового обґрунтування параметрів проникних бар'єрів.

Висновки

1. Запропоновано чисельну модель динаміки ґрунтових вод, для реалізації якої потрібні звичайні гідрологічні параметри.

2. Розроблено чисельну модель геоміграції, що дає можливість аналізувати ефективність використання проникного бар'єру в ґрунтових водах для зменшення забруднення водоносного шару.

3. Розроблено комп'ютерні програми для проведення обчислювального експерименту на базі розроблених чисельних моделей.

4. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують працездатність розроблених чисельних моделей для рішення складних задач геоміграції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення. [Чинний від 2017-01-04]. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2017. 135 с.
2. Acquah T., Appiah-Brempong M., Anornu G. K. Groundwater quality and associated health risks in the Eastern Region of Ghana. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, Iss. 2. Art. e41910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41910>
3. Afful S. K., Boateng C. D., Ahene E., Aryee J. N. A., Wemegah D. D., Gidigas S. S. R., Britwum A., Osei M. A., Gilbert J., Touré H., Mensah V. A systematic review of neural network applications for groundwater level prediction. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7, Iss. 9. Art. 942. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06817-5>
4. Alawneh A., Shawaqfah M., Nusier O., Odat A.-S. A., Al-Fugara A. Treated Wastewater for Sustainable Groundwater Recharge. *Proceedings of the International Conferences on Digital Technology Driven Engineering 2024*. (21 June 2025). P. 62–73. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-92044-8_7
5. Anda S. T., Fajriani Nurhamidah Putra R. A., Saad R., Rahman M. N. A. Utilizing Self-potential Techniques in Delineating Groundwater Flow. *Proceedings of the Innovative and Sustainable Infrastructure International Convention. Lecture Notes in Civil Engineering*. (03 July 2025). Singapore, 2025. P. 481–490. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-3804-8_43
6. Arya V., Rao M. S. Groundwater Recharge Potential Index and artificial groundwater recharge in the alluvial soils of the middle Ganga Basin. *Discover Applied Sciences*. 2024. Vol. 6, Iss. 7. Art. 367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05851-z>
7. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., Kozachyna V., Brazaluk I., Klym V., Tatarko L. Development of a Method for Assessing Air Dustiness in the Main Fairing of the Launch Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, № 1(119). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013>
8. Brahma S., Yachang O. Study of Groundwater Quality and Its Sustainability Using GIS Techniques in Kokrajhar, Assam, North East India. *Riverine, Estuarine and Marine Hydraulics. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (24 December 2024). Singapore, 2024. P. 553–565. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6009-1_52
9. Wu G., Dong Y., Liu L., Yao Y., Bi Y., Guo J., Gu S. Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. 2023. Vol. 43 : Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII. P. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.3233/atde230795>
10. Narayanamurthi V., Ramasamy, A. Comparison of Three Groundwater Models with Finite Element Methods for Groundwater Head Simulation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. (31 Jan. 2024). Singapore, 2024. P. 469–476. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6229-7_41
11. Tleane S. J., Ochieng G. M. Sources of Groundwater Contamination and Constituent Contaminants: A Review. *The Digital Edge: Transforming Business Systems for Strategic Success*. 2025. Vol. 584 : Studies in Systems, Decision and Control. P. 311–320. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85898-7_28
12. Wang F., Song K., Lan W., Li T., Liu J., Liu D. Identification and assessment of groundwater pollution from landfill leachate based on geophysical, spectroscopy, and hydrogeochemical methods. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 25558. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11189-2>
13. Winston R. B. Getting Started with MODFLOW. *The Groundwater Project*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-030-3>

M. M. BILIAIEV^{1*}, V. V. KOZACHYNA², O.Yu. GUNKO³, V. M. KUZNETSOV⁴,
O. V. ZVONAROVA⁵

^{1*}Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

³Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-9257-763X

⁴Dep. «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail gitann-vm@obz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2253-8103

⁵Dep. «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (067) 647 96 54, e-mail zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

Mathematical Modeling of the Neutralization Process of An Aggressive Impurity in Groundwater: An Express Model

Purpose. One of the modern means of protecting groundwater in the presence of aggressive impurities is the use of permeable barriers (reactive barrier). When conducting design work, it is important to determine the effectiveness of permeable barriers in advance. To solve such a complex problem, it is necessary to have specialized mathematical models. This paper considers the development of numerical models for calculating the process of neutralizing an aggressive impurity in the groundwater flow using a permeable barrier with regard to the flow hydrodynamics.

Methodology. The hydrodynamics of groundwater is described by a two-dimensional equation (planar model) of filtration of a non-pressure groundwater flow. To model the process of aggressive impurity movement in the groundwater flow, a two-dimensional equation of convective-dispersive spreading of the pollutant in a non-pressure groundwater flow is used. Two finite-difference splitting schemes are used to numerically integrate the groundwater filtration equation. For the numerical integration of the equation of mass transfer of an aggressive impurity, a splitting scheme for physical processes is used. **Finding.** The software implementation of the developed numerical models of groundwater dynamics and mass transfer of aggressive impurities was carried out. The developed computer codes are a tool for operational analysis of the permeable barrier efficiency. **Originality.** The solution to the complex problem of geomigration - the movement of an aggressive impurity and its neutralization in a permeable barrier - is considered. To analyze the efficiency of the permeable barrier, a numerical model of groundwater dynamics and mass transfer of an aggressive impurity in groundwater was developed. On the basis of the developed numerical models, computer codes for computational experiments were developed. The developed numerical models make it possible to carry out a series of calculations within one working day to scientifically substantiate the parameters of the permeable barrier. **Practical value.** The developed numerical models make it possible to quickly solve complex problems in the field of water resources protection from pollution.

Keywords: filtration; geomigration of groundwater pollution; mass transfer; mathematical modeling; permeable barrier

REFERENCES

1. Nastanova shchodo inzhenerneho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia, 135 DSTU-N B V.1.1-38:2016. (2017). (in Ukrainian)
2. Acquah, T., Appiah-Brempong, M., & Anornu, G. K. (2025). Groundwater quality and associated health risks in the Eastern Region of Ghana. *Heliyon*, 11(2), e41910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41910> (in English)
3. Afful, S. K., Boateng, C. D., Ahene, E., Aryee, J. N. A., Wemegah, D. D., Gidigas, S. S. R., Britwum, A., Osei, M. A., Gilbert, J., Touré, H., & Mensah, V. (2025). A systematic review of neural network applications for groundwater level prediction. *Discover Applied Sciences*, 7(9), 942. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06817-5> (in English)

4. Alawneh, A., Shawaqfah, M., Nusier, O., Odat, A.-S. A., & Al-Fugara, A. (2025, 21 June). Treated Wastewater for Sustainable Groundwater Recharge. In *Proceedings of the International Conferences on Digital Technology Driven Engineering 2024* (pp. 62-73). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-92044-8_7 (in English)
5. Anda, S. T., Fajriani Nurhamidah Putra, R. A., Saad, R., & Rahman, M. N. A. (2025, 03 July). Utilizing Self-potential Techniques in Delineating Groundwater Flow. In *Proceedings of the Innovative and Sustainable Infrastructure International Convention. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 481-490). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-3804-8_43 (in English)
6. Arya, V., & Rao, M. S. (2024). Groundwater Recharge Potential Index and artificial groundwater recharge in the alluvial soils of the middle Ganga Basin. *Discover Applied Sciences*, 6(7), 367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05851-z> (in English)
7. Biliaiev, M., Biliaieva, V., Rusakova, T., Kozachyna, V., Berlov, O., Semenenko, P., Kozachyna, V., Brazaluk, I., Klym, V., & Tatarko, L. (2022). Development of a Method for Assessing Air Dustiness in the Main Fairing of the Launch Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(119)), 17-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013> (in English)
8. Brahma, S., & Yachang, O. (2024, 24 December). Study of Groundwater Quality and Its Sustainability Using GIS Techniques in Kokrajhar, Assam, North East India. In *Riverine, Estuarine and Marine Hydraulics. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 553-565). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6009-1_52 (in English)
9. Wu, G., Dong, Y., Liu, L., Yao, Y., Bi, Y., Guo, J., & Gu, S. (2023). Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. In *Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII* (pp. 766-774). DOI: <https://doi.org/10.3233/atde230795> (in English)
10. Narayanamurthi, V., & Ramasamy, A. (2024, 31 Jan.). Comparison of Three Groundwater Models with Finite Element Methods for Groundwater Head Simulation. In *Recent Advances in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 469-476). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6229-7_41 (in English)
11. Tleane, S. J., & Ochieng, G. M. (2025). Sources of Groundwater Contamination and Constituent Contaminants: A Review. In *The Digital Edge: Transforming Business Systems for Strategic Success. Studies in Systems, Decision and Control* (pp. 311-320). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85898-7_28 (in English)
12. Wang, F., Song, K., Lan, W., Li, T., Liu, J., & Liu, D. (2025). Identification and assessment of groundwater pollution from landfill leachate based on geophysical, spectroscopy, and hydrogeochemical methods. *Scientific Reports*, 15, 25558. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11189-2> (in English)
13. Winston, R. B. (2023). Getting Started with MODFLOW. *The Groundwater Project*. DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-030-3> (in English)

Надійшла до редколегії: 01.08.2025

Прийнята до друку: 16.12.2025