

**АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ
МОДЕЛЮВАННЯ Й АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ
ЗВОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ
ПІДПРИЄМСТВ**

Анотація. У статті здійснено системний аналіз програмних засобів, що застосовуються для моделювання та автоматизованого управління у системах зворотного водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління водними ресурсами шляхом оптимізації процесів очищення та повторного використання води. Постановка проблеми полягає у визначенні найбільш придатних програмних інструментів для моделювання складних гідродинамічних та технологічних процесів. Метою дослідження є обґрунтування вибору програмних засобів на основі аналізу їхніх функціональних можливостей та відповідності специфіці об'єкта управління. У роботі використано методи системного аналізу, порівняльного оцінювання та експертного аналізу програмних рішень. У результаті визначено переваги й недоліки розглянутих програмних платформ, що дозволяє сформулювати рекомендації щодо їхнього використання у практиці проектування та експлуатації систем зворотного водопостачання.

Ключові слова: системи зворотного водопостачання, гірничо-збагачувальні підприємства, моделювання, гідродинамічні процеси, чисельні методи, моделювання турбулентності, програмні засоби, процеси фільтрації

Постановка проблеми. Системи зворотного водопостачання на підприємствах гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК) відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності виробничих процесів і збереженні ресурсів. Вони дозволяють значно знизити споживання води за рахунок її повторного використання, що є критично важливим для збереження екологічного балансу і зниження витрат на водопостачання. Проте ці системи є складними, і їх ефективність значною мірою залежить від правильного моделювання потоку рідини та всіх взаємодій між основними компонентами системи — насосами, трубопроводами, фільтрами та іншими елементами.

Одна з основних проблем у моделюванні таких систем полягає в складності прогнозування динаміки потоку в умовах змінних параметрів роботи — від різних витрат води до коливань тиску і температури. Крім того, традиційні методи моделювання часто не враховують складні фізичні процеси, які відбуваються в системах зворотного водопостачання, такі як кавітація, турбулентність або взаємодія з хімічними речовинами.

Існуючі підходи до моделювання потоку рідини в таких системах часто обмежуються використанням спрощених рівнянь, які можуть не відображати всі складнощі роботи таких систем, що, в свою чергу, призводить до неточностей у розрахунках і, як наслідок, до втрат в енергоефективності і водозбереженні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед існуючих методів моделювання потоку рідини у системах зворотного водопостачання можна виділити наступні [1]:

1) Аналітичні методи. Аналітичні методи моделювання потоку рідини в зворотних водопостачальних системах використовуються для розв'язування задачі руху рідини в трубопроводах та інших елементах системи. У багатьох випадках ці методи базуються на рівняннях Бернуллі та рівняннях для ідеальних рідин, таких як рівняння для незріджуваних рідин або рівняння Нав'є-Стокса для стаціонарного потоку. Ці рівняння застосовуються для розрахунку витрат, швидкостей потоку та тиску, однак вони мають обмеження в контексті реальних умов. Наприклад, багато аналітичних моделей не можуть врахувати складні явища, такі як турбулентність, кавітація чи нелінійні зміни в характеристиках потоку, що є важливими в реальних умовах гірничо-збагачувальних підприємств. Аналітичні моделі зручні для первісної оцінки ефективності системи, однак вони значно обмежують можливість точного прогнозування у випадках, коли потрібно враховувати складні динамічні та термодинамічні процеси. Тому для складних технологічних процесів їх застосування часто є неефективним.

2) Чисельні методи. Зі збільшенням обчислювальних потужностей значно зростає роль чисельних методів, зокрема методу кінцевих елементів (МКЕ) та методів об'ємів для аналізу та моделювання потоків рідин у складних системах [2]. Відомим прикладом є методи Computational Fluid Dynamics (CFD), які активно використовуються для моделювання і аналізу потоку рідини в трубопроводах, насосах, фільтрувальних установках та інших елементах зворотних водопостачальних систем. Застосування CFD дозволяє враховувати такі явища, як турбулентність, кавітація, змішування, а також включати ефекти температури і хімічних реакцій. Чисельні методи, зокрема CFD, дають більш точні результати, однак вони потребують великих обчислювальних ресурсів, а також великої кількості вхідних даних для точного налаштування моделей. Крім того, ці методи можуть бути дуже чутливими до початкових умов, що робить їх застосування в реальних умовах більш складним.

3) Гібридні методи. Гібридні методи є спробою поєднання переваг аналітичних та чисельних підходів [3]. Ці методи використовують простіші аналітичні моделі для попередньої оцінки основних параметрів системи і чисельні методи для детального аналізу окремих частин системи, таких як насосні станції або фільтри. Наприклад, спочатку може бути застосована модель для прогнозування загальних витрат води і налаштування характеристик насосів, а потім для детального аналізу використовуються CFD моделі для визначення оптимальних параметрів. Хоча такий підхід знижує обчислювальні витрати та може забезпечити більш швидкі результати, він потребує значної інтеграції різних підходів, а також досвіду в розробці комбінованих моделей для конкретних умов.

Існуючі методи моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання мають різні переваги та недоліки. Традиційні аналітичні моделі не здатні врахувати всі аспекти реальних процесів, в той час як чисельні методи, зокрема CFD, дозволяють моделювати складні гідродинамічні явища, але потребують великих обчислювальних ресурсів. Гібридні методи дозволяють оптимізувати ці підходи, однак вони потребують глибоких досліджень для точного налаштування і інтеграції різних моделей в реальних умовах підприємств.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є розробка та вдосконалення методів моделювання потоку рідини у системах зворотного водопостачання на підприємствах гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК), з урахуванням специфічних умов експлуатації, таких як високий рівень забруднень, зміни температури та турбулентність потоку. У рамках цього дослідження передбачається також аналіз та вибір програмних систем для чисельного моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання підприємств ГЗК використовуються чисельні методи, зокрема, методи розв'язку рівнянь гідродинаміки, що описують поведінку потоку в трубопроводах. Розглянемо детальніше основні математичні моделі та методи.

1) Рівняння Нав'є-Стокса. Основним рівнянням, що описує рух нестационарного потоку рідини є рівняння Нав'є-Стокса для рідини в умовах турбулентного потоку [4]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (1)$$

де ρ - густина рідини, \mathbf{u} - вектор швидкості потоку, t - час, p - тиск, μ - динамічна в'язкість рідини, \mathbf{f} - сили, що діють на рідину (наприклад, гравітація або сила стискування).

Це рівняння описує закон руху рідини в середовищі з врахуванням всіх сил, які впливають на потік. Для опису турбулентних потоків, як правило, використовують модель турбулентності, таку як модель $k-\epsilon$

2) Модель турбулентності $k-\epsilon$ [5]. Для більш точної моделі турбулентних течій використовується модель $k-\epsilon$, яка описує енергетику турбулентних струмів. Вона складається з двох додаткових рівнянь для величин: k - кінетична енергія турбулентності, ϵ - коефіцієнт дисипації турбулентності.

Рівняння для k та ϵ виглядають наступним чином:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot (\mu_T \nabla k) + P_k - \epsilon; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot (\mu_T \nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon^2, \quad (3)$$

де μ_T - турбулентна в'язкість, P_k - потужність, що передається в турбулентність від основного потоку, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ - постійні, які залежать від обраної моделі турбулентності.

Модель $k-\epsilon$ є однією з найбільш широко застосовуваних завдяки своїй здатності точно описувати турбулентні потоки в різних умовах.

3) Моделювання процесу фільтрації та переміщення забруднювачів [6]. Для опису процесу переміщення забруднювачів у системах зворотного водопостачання використовуються рівняння переносу, які описують концентрацію забруднювачів у потоці рідини. Загальна форма рівняння переносу виглядає наступним чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C + R(C), \quad (4)$$

де C - концентрація забруднювача, D - коефіцієнт дифузії, $R(C)$ — терміни, що описують хімічні реакції або взаємодії забруднювачів.

Це рівняння дозволяє моделювати, як забруднювачі переміщуються з потоком рідини та як змінюється їхня концентрація під впливом різних процесів очищення.

4) Чисельне вирішення рівнянь. Для чисельного розв'язку отриманих рівнянь використовуються методи, зокрема метод кінцевих об'ємів (Finite Volume Method, FVM) [7]. Цей метод дозволяє ефективно працювати з нерівномірними сітками та забезпечує точність при великих швидкостях потоку та складних геометріях.

Один з варіантів чисельного розв'язку рівняння Нав'є-Стокса та рівнянь для забруднювачів може бути представлено у наступному вигляді:

$$\mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{U}^n + \Delta t \cdot (\mathbf{S} - \nabla \cdot \mathbf{F}), \quad (5)$$

де \mathbf{U} - вектор змінних (швидкість, тиск, концентрація), \mathbf{S} - джерела сили та маси (наприклад, зовнішні сили), \mathbf{F} - потоки (енергія, забруднювачі), Δt - крок часу.

Для успішного вирішення цих задач важливо використовувати сучасні програмні інструменти, які дозволяють забезпечити високу точність чисельних розрахунків та врахувати специфічні характеристики таких систем, включаючи турбулентність, температурні коливання та забруднення. Оскільки вибір програмного забезпечення безпосередньо впливає на результативність моделювання та його відповідність реальним умовам, проведемо аналіз сучасних програмних комплексів, що використовуються для вирішення цих задач. У сучасному інженерному та екологічному моделюванні для аналізу гідродинамічних процесів використовуються чисельні методи та потужні програмні засоби. Найбільш відповідними до умов дослідження потоків рідини в системах зворотного водопостачання підприємств ГЗК є:

1) ANSYS Fluent — це один з найбільш широко застосовуваних програмних продуктів для моделювання потоків рідин та газів, що працює за допомогою чисельного методу кінцевих об'ємів (FVM) [7,8]. Fluent дозволяє ефективно моделювати як ламінарні, так і турбулентні потоки, а також передбачає інтерфейси для розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, що описують рух рідини, і моделює різні процеси переносу (теплообмін, масоперенос). Програмний продукт також містить вбудовані моделі турбулентності, зокрема $k-\epsilon$ та $k-\omega$, які є корисними для опису поведінки потоків у складних інженерних системах. Основними можливостями системи є:

- моделювання турбулентних і нетурбулентних потоків;
- аналіз теплових процесів та процесів масопереносу;
- інтерфейси для врахування реакцій на забруднювачі;
- інтеграція з іншими інженерними програмами для комплексного аналізу.

2) COMSOL Multiphysics — це програмний продукт для багатоцільового моделювання фізичних явищ, включаючи гідродинаміку, теплоперенос та масоперенос [9]. Він підтримує метод кінцевих елементів (FEM), що дозволяє використовувати складні геометрії та адаптувати моделі для кожної конкретної задачі. COMSOL дозволяє налаштовувати специфічні моделі для систем водопостачання, зокрема для процесів фільтрації, осадження та обробки забруднень. Це дуже гнучкий інструмент, що підходить для моделювання різних параметрів системи, включаючи стани та динаміку турбулентних потоків. Основними можливостями системи є:

- моделювання багато фізичних процесів одночасно (тепло, масоперенос);
- гнучке налаштування моделі за рахунок методу кінцевих елементів;
- підтримка великих обчислювальних задач за допомогою паралельного виконання;
- можливість інтеграції з іншими програмами для розширеного аналізу.

3) OpenFOAM — це відкрите програмне забезпечення для чисельного моделювання, яке спеціалізується на розв'язуванні задач гідродинаміки, термодинаміки, а також процесів переносу [10]. Завдяки відкритому коду, OpenFOAM дозволяє дослідникам адаптувати існуючі моделі і створювати нові для вирішення специфічних задач, включаючи моделювання турбулентних потоків, а також процесів очищення води у зворотних водопостачальних системах. OpenFOAM широко застосовується у наукових дослідженнях завдяки своїй гнучкості та здатності вирішувати складні інженерні задачі. Основними можливостями системи є:

- відкритий код, що дозволяє модифікувати і налаштовувати програму під специфічні задачі;
- підтримка розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса та моделей турбулентності;
- моделювання складних геометрій та великих обчислювальних задач;
- підтримка багатофазних потоків та процесів переносу.

4) Matlab/Simulink — популярне середовище для математичного моделювання, яке дозволяє створювати та аналізувати моделі складних фізичних систем, включаючи гідродинамічні процеси [11]. Matlab надає великий набір функцій для чисельного інтегрування рівнянь, а Simulink є зручним інструментом для візуального моделювання та симуляції. Для задач зворотного водопостачання можна використовувати спеціалізовані блоки для моделювання потоків, фільтраційних процесів та забруднень. Крім того, Matlab добре підходить для створення користувацьких функцій, необхідних для специфічних досліджень. Основними можливостями системи є:

- вбудовані функції для чисельного вирішення диференціальних рівнянь та математичних задач;
- підтримка візуального моделювання за допомогою Simulink;
- можливість інтеграції з іншими програмами та математичними пакетами.

На основі проведеного аналізу різних програмних засобів для моделювання потоку рідини в зворотних водопостачальних системах, було розроблено порівняльну таблицю, (Таб.1) що описує їх можливості та функціональні відмінності.

Порівняння можливостей програмних продуктів для моделювання потоків рідини

| Програмне забезпечення | Моделювання турбулентних потоків | Моделювання переносу забруднювачів | Моделювання фільтрації | Гнучкість налаштувань | Вартість |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------|
| ANSYS Fluent | + | + | + | - | Висока |
| COMSOL Multiphysics | + | + | + | + | Висока |
| OpenFOAM | + | + | + | + | Низька |
| Matlab/Simulink | - | + | - | + | Середня |

Вибір програмного інструменту для моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання залежить від конкретних вимог до задачі, доступного бюджету та технічних можливостей. ANSYS Fluent та COMSOL Multiphysics є потужними інструментами, які забезпечують високий рівень точності та великі можливості для налаштувань, однак, їх висока вартість і вимоги до апаратних ресурсів можуть стати бар'єром для малих підприємств чи лабораторій. OpenFOAM будучи відкритим програмним забезпеченням, має значну гнучкість і можливість налаштування під специфічні потреби, що робить його чудовим варіантом для академічних і дослідницьких проєктів. Matlab/Simulink дає можливість ефективно вирішувати задачі з переносу та фільтрації, хоча й потребує додаткових налаштувань для вирішення гідродинамічних задач.

Висновки. Здійснений аналіз дозволяє зробити наступні висновки. Вибір програмного забезпечення для моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання значною мірою залежить від конкретних вимог задачі та доступних ресурсів. Для великих підприємств, що потребують високої точності та можливості інтеграції з іншими системами, найкраще підходять ANSYS Fluent або COMSOL Multiphysics. Для досліджень або малих підприємств, де важлива гнучкість налаштувань і доступність, варто звернути увагу на OpenFOAM, оскільки він не потребує великих інвестицій у ліцензії і надає великий простір для адаптації. Matlab/Simulink підходить для завдань, що вимагають комплексного моделювання з різними фізичними процесами. Таким чином, для кожної конкретної задачі слід ретельно оцінити не лише можливості програмного забезпечення, але й витрати на його ліцензування, технічні вимоги та рівень підтримки користувачів, щоб забезпечити оптимальні результати у вирішенні задач водопостачання.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ferziger H. J., Peric M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin, pp. 329–364. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2.
2. Versteeg H. K., Malalasekera W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.
3. Roache P. J. (1998). Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Hermosa Publishers.

4. Li Z., Bouscasse B., Ducrozet G., Gentaz L., Le Touzé D., Ferrant P. (2021). Spectral Wave Explicit Navier-Stokes Equations for wave-structure interactions using two-phase Computational Fluid Dynamics solvers. *Ocean Engineering*, 221, 108513. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108513.
5. Cotas C., Silva R., Garcia F., Faia P., Asendrych D., Rasteiro M. G. (2015). Application of Different Low-Reynolds $k-\varepsilon$ Turbulence Models to Model the Flow of Concentrated Pulp Suspensions in Pipes. *Procedia Engineering*, 102, 1326–1335. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.263.
6. Meftah Almukhtar N., Othman M. H. D., Tai Z. S., Kurniawan T. A., Puteh M. H., Jaafar J., Rahman M. A., Ismail A. F., Rajamohan N., Abdullah H., Wong K. Y. (2024). Recent strategies for enhancing the performance and lifespan of low-cost ceramic membranes in water filtration and treatment processes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 62, 105399. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105399.
7. Pal S., Kottam R. R., Lambert M. F., Hanmaiahgari P. R. (2024). Estimation of deposit thickness in single-phase liquid flow pipeline using finite volume modelling. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 4(1), 100145. DOI: 10.1016/j.jpse.2023.100145.
8. ANSYS Fluent User's Guide (2021). ANSYS, Inc.
9. Devi R., Upadhyaya Y. K., Manasa S., Abhinav, Tripathi A. (2024). Efficient Solar Cell Using COMSOL Multiphysics. In: Shrivastava V., Bansal J. C., Panigrahi B. K. (eds) *Power Engineering and Intelligent Systems. PEIS 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1097, Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-99-7216-6_8.
10. OpenFOAM User Guide (2020). OpenFOAM. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/>.
- 11 Sun P., Zhao H., Liao L., Zhang J., Su G. (2017). Control system design and validation platform development for small pressurized water reactors (SPWR) by coupling an engineering simulator and MATLAB/Simulink. *Annals of Nuclear Energy*, 102, 309–316. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.12.034.

Received 15.01.2025.

Accepted 17.01.2025.

Analysis and justification of the selection of software tools for modeling and automated control of recirculating water supply systems in mining and processing enterprises

This study provides a systematic analysis of software solutions used for modeling and managing recirculating water supply systems. The research focuses on identifying computational tools that are best suited for simulating complex fluid dynamics, turbulence effects, and filtration processes within these systems. The primary objective is to justify the choice of software based on its functional capabilities, accuracy in replicating real-world conditions, and potential for integration into industrial automation frameworks.

The methodology involves a comparative evaluation of existing modeling platforms, assessing their numerical algorithms, interface design, computational efficiency, and adaptability to the specific requirements of mining water management. Expert analysis is applied to determine the advantages and limitations of different software packages in terms of

precision, scalability, and ease of implementation. Key factors considered include the ability to model multiphase flows, predict contaminant transport, and optimize filtration strategies.

The results highlight the strengths and weaknesses of various software tools, providing practical recommendations for their application in system design, process optimization, and operational management. The findings contribute to improving decision-making in the selection of digital solutions for water resource management, leading to enhanced automation, cost-effectiveness, and environmental sustainability. By offering a structured evaluation of modeling and automation tools, this research supports engineers and decision-makers in implementing more effective recirculating water supply systems. The proposed approach facilitates improved process control, reduces water consumption, minimizes pollution risks, and enhances the overall sustainability of mining and processing operations.

Пікільняк Андрій Валерійович – к.т.н., доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет

Pikilniak Andrii – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kryvyi Rih National University.