

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ГІДРАВЛІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ

Олександр Кравченко¹, Тетяна Куба²,
Оксана Нечипор³, Нестан Таварткіладзе⁴

Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна

¹ докт. техн. наук, kravchenko.ov@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6289-0641

² cubatan2@gmail.com, orcid.org/0009-0003-1223-1818

³ канд. техн. наук, okschena@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8635-2231

⁴ knucavv20@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6712-9576

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.50.49-60

Анотація: У статті представлено поглиблений аналіз сучасного міжнародного досвіду у сфері гідравлічного моделювання систем водопостачання та водовідведення. Детально розглянуто фундаментальні гідравлічні принципи, які покладено в основу моделювання, та їх реалізація у спеціалізованих програмних комплексах (зокрема, EPANET, WaterGEMS, SewerGEMS, InfoWorks ICM та ін.). Спираючись на міжнародні керівництва, зокрема AWWA M32, особливу увагу приділено вимогам до побудови, рівням деталізації (від скелетонізованих до повнотрубних моделей), процедурам калібрування та валідації гідравлічних моделей, наведено загальноприйняті критерії точності моделювання для різних інженерних завдань. Також досліджено вітчизняний досвід застосування програмних продуктів, зокрема українських комплексів "РІКОМ" та "ГІДРА", створенні геоінформаційних систем (ГІС) водоканалів. Проведено комплексний аналіз чинного українського законодавства у цій сфері, зокрема ДБН В.2.5-74:2013, щодо наявності та повноти вимог до гідравлічного моделювання. Виявлено суттєві прогалини у вітчизняній нормативній базі щодо стандартизації процесів створення, верифікації, використання та інтеграції гідравлічних моделей з ГІС. Обґрунтовується нагальна необхідність удосконалення українських нормативних документів для встановлення чітких та сучасних "правил гри" у сфері гідравлічного моделювання при проектуванні, експлуатації та розробленні ГІС для підприємств водопровідно-каналізаційного господарства, що сприятиме підвищенню ефективності та надійності їх роботи.

Ключові слова: гідравлічне моделювання, системи водопостачання та водовідведення, програмне забезпечення, EPANET, WaterGEMS, РІКОМ, ГІДРА, калібрування, валідація моделі, точність моделювання, ГІС, насосні станції, оптимізація мереж.

ВСТУП

Ефективне функціонування та сталий розвиток інфраструктури водопостачання та водовідведення у сучасних умовах нерозривно пов'язані із застосуванням передових інформаційних технологій, серед яких ключове місце займає гідравлічне моделювання. Комп'ютерні моделі гідравлічних процесів у мережах

водопостачання та водовідведення перетворилися з допоміжного інструменту на базовий елемент проектування, аналізу, оптимізації та управління цими складними інженерними системами. Такі моделі дозволяють не лише розраховувати потоки та тиски, а й аналізувати роботу системи в динаміці, прогнозувати нас-

лідки різних управлінських рішень, оптимізувати енергоспоживання насосних станцій, планувати розвиток мереж з урахуванням майбутніх потреб, моделювати якість води та ефективно управляти активами.

Світова інженерна спільнота, зокрема такі провідні організації як Американська асоціація водоохоронних організацій (AWWA) та Міжнародна водна асоціація (IWA), приділяє значну увагу розробці стандартів, методик і навчальних матеріалів з гідравлічного моделювання. Це сприяє уніфікації підходів та підвищенню якості модельних досліджень. На противагу цьому в Україні нормативно-правова база, що регулює питання застосування гідравлічного моделювання в галузі водопостачання/водовідведення, зокрема при проєктуванні нових та реконструкції існуючих систем, а також при створенні та використанні ГІС, характеризується фрагментарністю та недостатньою деталізацією. Відсутність чітких вимог до створення, калібрування, валідації та використання гідравлічних моделей створює ризики щодо якості проєктних рішень, ефективності інвестицій та надійності експлуатації систем водопостачання та водовідведення.

Стаття має на меті здійснити комплексний аналіз сучасного міжнародного досвіду у сфері гідравлічного моделювання мереж водопостачання, водовідведення та насосних

станцій. У статті детально розглядаються питання вибору рівня деталізації моделей, процедури їх калібрування та валідації, критерії точності, а також подано огляд найпоширеніших програмних комплексів. Окрему увагу приділено вітчизняному досвіду та програмним розробкам у цій сфері. На підставі порівняльного аналізу міжнародної практики та стану української нормативної бази обґрунтовується необхідність її термінового удосконалення для встановлення прозорих та ефективних правил у сфері гідравлічного моделювання.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

В основі будь-якої комп'ютерної гідравлічної моделі лежать фундаментальні фізичні закони, що описують рух рідини в трубопроводах [1-5]. Для напірних систем, до яких належить більшість водопровідних мереж, ключовими є наступні закони, наведені в табл. 1:

Математична модель водопровідної мережі представляє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описують зазначені закони для всіх елементів мережі. Розв'язання цієї системи дозволяє визначити тиски у вузлах та витрати на окремих ділянках труб.

Точний розрахунок втрат напору є критичним для адекватності моделі (табл. 2).

Табл. 1. Закони фізики, що описують рух рідини в трубопроводах

Table 1. Laws of physics describing the movement of fluid in pipelines

Закон	Формулювання	Суть для комп'ютерної моделі
Рівняння нерозривності потоку (закон збереження маси)	Алгебраїчна сума витрат води, що входять і виходять з вузла, дорівнює нулю або відповідає відбору/притоку.	Забезпечує баланс маси в кожному вузлі мережі
Рівняння Бернуллі (закон збереження енергії)	Сума геометричного, п'єзометричного і швидкісного напорів зменшується на втрати через тертя і місцеві опори.	Дозволяє обчислювати енерговтрати на ділянках трубопроводу
Перший закон Кірхгофа (аналог закону струмів)	Алгебраїчна сума витрат у вузлі дорівнює нулю.	Використовується для забезпечення балансу витрат у кожному вузлі
Другий закон Кірхгофа (аналог закону напруги)	Алгебраїчна сума втрат напору по замкнутому контуру дорівнює нулю.	Визначає взаємозалежності напорів у кільцевих схемах мережі

Табл. 2. Види втрат напору, що виникають під час транспортування води трубопроводами
Table 2. Types of pressure losses that occur during water transportation through pipelines

Тип втрат	Формула	Опис / Умови застосування
Втрати на тертя по довжині (hf)	1. Рівняння Газена-Вільямса: $hf = \frac{C^{1,852} \cdot L \cdot Q^{1,852}}{D^{4,871} \cdot 10,67}$	Емпірична формула, популярна в США. Обмежена точність. Підходить для напірних водопроводів.
	2. Рівняння Дарсі-Вейсбаха: $hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	Теоретично обґрунтована, універсальна формула. Рекомендується міжнародними стандартами (напр., EN 805).
	Коефіцієнт тертя (f) визначається за рівнянням Колбрука-Уайта $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$	Враховує число Рейнольдса (Re) і відносну шорсткість труби (k/D).
Місцеві втрати напору (hm)	$hm = K \cdot \frac{v^2}{2g}$	Виникають на колінах, трійниках, арматурі, звуженнях/розширеннях. K – коефіцієнт місцевого опору.
Самопливні мережі	Рівняння Маннінга: $v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}}$	Застосовується для самопливних каналізацій. R – гідравлічний радіус, i – ухил, n – коефіцієнт шорсткості.

Вибір правильних коефіцієнтів шорсткості (C , k або n) є ключовим і водночас одним із найскладніших етапів параметризації моделі, особливо для існуючих мереж, де шорсткість змінюється з часом унаслідок корозії, відкладень або біобіостання.

Міжнародна практика використання програмного забезпечення для гідравлічного моделювання

Сучасне гідравлічне моделювання нерозривно пов'язане із застосуванням спеціалізованих програмних комплексів (ПК). На світовому ринку представлено низку потужних програмних продуктів, які стали де-факто стандартами в галузі у сфері водопостачання та водовідведення.

EPANET (US EPA) – безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом (обчислювальне ядро), розроблене Агентством з охорони навколишнього середовища США (US EPA) [6]. Широко використову-

ється для моделювання напірних водопровідних мереж як у сталому (стаціонарному) режимі, так і в режимі розширеного моделювання у часі (EPS – Extended Period Simulation). Підтримує також моделювання якості води (поширення хлору, визначення віку води, концентрацій домішок тощо). Багато комерційних програмних комплексів використовують обчислювальне ядро EPANET як основу для власних моделей.

WaterGEMS, WaterCAD (Bentley Systems) – провідні комерційні програмні продукти для моделювання систем водопостачання, які відзначаються розвиненим графічним інтерфейсом, потужними інструментами для побудови гідравлічних моделей, інтеграцією з ГІС-системами (ArcGIS, MapInfo) та CAD-платформами (AutoCAD, MicroStation). До їх складу входять спеціалізовані модулі для калібрування моделей, оптимізації роботи мереж, аналізу енергоефективності насосного обладнання, розрахунку

гідроударів, а також проєктування систем протипожежного водопостачання

SewerGEMS, SewerCAD, StormCAD (Bentley Systems) – комплексні програмні рішення для моделювання систем водовідведення (господарсько-побутових, зливових та комбінованих), які забезпечують розрахунок як самопливних, так і напірних ділянок мереж, включаючи моделювання роботи насосних станцій, очисних споруд, процесів очищення та транспортування стічних вод. Також підтримується моделювання якості стічних вод і виконання гідрологічних розрахунків.

InfoWorks ICM (Innovyze, an Autodesk company) – інтегрований програмний пакет для комплексного моделювання міських водних систем. Дає змогу одночасно аналізувати системи водопостачання, водовідведення, зливової каналізації та річкові системи з урахуванням їх взаємодії, зокрема при моделюванні паводків і затоплень.

AQUIS (Grundfos), MIKE URBAN (DHI), H2ONET (Autodesk) – інші відомі комерційні програмні продукти з широким функціоналом для моделювання систем водопостачання та водовідведення.

Вказані програмні продукти дозволяють вирішувати широкий спектр завдань: від розробки генеральних схем водопостачання і водовідведення до детального проєктування окремих елементів, аналізу роботи існуючих мереж, планування реконструкції, оптимізації режимів роботи насосних станцій, оцінки надійності систем та розробки планів реагування на аварійні ситуації.

Побудова моделі. Деталізація та введення даних

Створення адекватної гідравлічної моделі починається з ретельного збору та введення даних про фізичну систему. Рівні деталізації моделі включають:

Скелетонізована модель (Skeletonized Model) – спрощене представлення мережі, що включає лише магістральні та основні розподільчі трубопроводи, великі насосні станції та

резервуари. Дрібніші мережі та окремі споживачі агрегуються об'єднуються або подаються узагальнено. Такі моделі застосовуються для стратегічного планування, аналізу роботи магістральних мереж, розробки генеральних схем.

Повнотрубна модель (All-Pipes Model) передбачає відображення всіх або майже всіх елементів мережі, включаючи внутрішньоквартальні, а в окремих випадках навіть будинкові вводи. Такі моделі є точнішими, однак потребують значно більшого обсягу вхідних даних і обчислювальних ресурсів. Вони використовуються для детального гідравлічного аналізу, оптимізації, пошуку витоків, моделювання якості води.

Гібридні моделі поєднують різні рівні деталізації для різних зон мережі. Вибір рівня деталізації залежить від мети моделювання, доступності даних та наявних ресурсів.

Основні вхідні дані для моделі подано далі.

Геометрія мережі: топологія (зв'язність труб та вузлів), координати вузлів, довжини та діаметри трубопроводів. Джерела даних – геоінформаційні системи (ГІС), проєктна документація, дані інвентаризації.

Характеристики труб: матеріал, внутрішній діаметр (з урахуванням можливих відкладень), коефіцієнт шорсткості (з урахуванням віку та стану).

Вузлові дані: висотні позначки, базовий попит (середньодобове споживання), добові, тижневі та сезонні графіки нерівномірності водоспоживання для різних категорій споживачів.

Насосні станції: характеристики насосів (Q - H криві, криві ККД), типи та налаштування керування (за часом, рівнем, тиском).

Резервуари та водонапірні башти: геометричні розміри, робочі рівні (мінімальний, максимальний, початковий), типи керування наповненням і спорожненням.

Арматура: типи (засувки, регулятори тиску, витрати, зворотні клапани), їх розташування, статус (відкрито/закрито) та налаштування.

Найбільшу невизначеність зазвичай становлять фактичні коефіцієнти шорсткості старих труб та реальний розподіл водоспоживання по вузлах мережі.

Калібрування та валідація гідравлічних моделей. Міжнародні підходи

Створення математичної моделі – це лише перший етап. Щоб модель стала надійним інструментом, її необхідно калібрувати та валідувати.

Калібрування моделі (Model Calibration) – це ітераційний процес налаштування параметрів моделі (тих, що мають найбільшу невизначеність, наприклад, шорсткості труб, розподіл попиту, характеристики насосів, налаштування регуляторів) таким чином, щоб результати моделювання (розрахункові тиски у вузлах, витрати на ділянках, рівні в резервуарах) максимально відповідали даним, отриманим під час польових вимірювань на реальній системі. Калібрування може проводитися як для стаціонарного режиму (наприклад, для умов середньодобового споживання), так і для динамічного режиму (EPS), порівнюючи часові ряди модельних та вимірних параметрів.

Валідація моделі (Model Validation). Після завершення калібрування необхідно перевірити, наскільки добре модель відтворює поведінку системи за умов, які не використовувалися під час калібрування. Для цього використовується другий, незалежний набір польових даних. Якщо результати валідації задовільні, модель вважається адекватною для подальшого використання.

Основним документом, що регламентує процес моделювання та калібрування водорозподільних систем, вважається посібник **AWWA M32 "Комп'ютерне моделювання водорозподільних систем"** ("Computer Modeling of Water Distribution Systems") [7] та доповнючий його **"Довідник з калібрування моделей водорозподільних систем"**

("Handbook for Water Distribution System Model Calibration") від AWWA. Ці документи надають детальні рекомендації щодо:

- планування програми моделювання;
- збору необхідних даних (геометрія мережі, попит, характеристики обладнання);
- польових вимірювань для калібрування (вибір точок вимірювання тиску, вимірювання витрат, тестування пожежних гідрантів, визначення характеристик насосів);
- методів калібрування (ручне, автоматизоване з використанням оптимізаційних алгоритмів);
- оцінки точності калібрування.

Для ефективного калібрування необхідні якісні польові дані, зібрані синхронно або для чітко визначених часових зрізів:

- тиски у вузлах мережі (у диктуючих точках, на межах зон тиску);
- витрати на магістральних водогонах, на вході в зони, на насосних станціях;
- рівні води в резервуарах та водонапірних баштах;
- стан роботи насосів (ввімкнено/вимкнено, швидкість обертання);
- положення регулюючої арматури;

Дані SCADA-систем є надзвичайно цінними для калібрування в динамічному режимі (EPS).

Хоча універсальні, жорстко встановлені нормативи точності калібрування відсутні, оскільки вимоги залежать від мети моделювання ("fitness-for-purpose approach"), існують загальноприйняті в міжнародній практиці орієнтири (табл. 3).

Важливо не лише досягти формальної відповідності окремим показникам, а й забезпечити коректне відтворення моделлю загальної гідравлічної поведінки системи.

Після калібрування обов'язковим є проведення аналізу чутливості моделі до зміни ключових параметрів.

Табл. 3. Загальні орієнтири точності калібрування гідравлічних моделей
Table 3. General guidelines for the accuracy of calibration of hydraulic models

Параметр	Типовий цільовий діапазон точності	Джерело/Контекст
Тиск у вузлах (стаціонарний режим)	$\pm 0.5 - \pm 1.5$ м вод. ст. (або $\pm 5-10\%$ від діапазону змін тиску в зоні)	Загальна галузева практика, AWWA M32
Тиск у вузлах (пікові навантаження, пожежа)	$\pm 1.0 - \pm 2.0$ м вод. ст. (або $\pm 10-15\%$ від перепаду тиску)	Складніше досягти через більшу невизначеність попиту та динамічність умов
Витрата на ділянках магістральних труб	$\pm 5\% - \pm 10\%$ від виміряної витрати	Загальна галузева практика, AWWA M32
Рівень води в резервуарі	$\pm 0.15 - \pm 0.5$ м	Загальна галузева практика, AWWA M32
Коефіцієнт детермінації (R^2) (тиск)	$> 0.85 - 0.90$ (бажано > 0.95)	Статистичний показник відповідності, приклади з досліджень
Середня абсолютна похибка (MAE) для тиску	$< 0.5 - 1.0$ м вод. ст.	Чим менше, тим краще
Відповідність графіків (для EPS)	Візуальна відповідність часових рядів тисків/рівнів, мінімізація середньоквадратичної похибки (RMSE)	Важливо для динамічних моделей

Вітчизняний досвід та інші програмні рішення у сфері гідравлічного моделювання

В Україні також є досвід розробки та застосування програмних комплексів для гідравлічного моделювання та створення на їх основі ГІС для підприємств водопостачання і водовідведення.

Програмний комплекс "РІКОМ" (ТОВ "НП РІКОМ", Україна) – розрахунково-інформаційний комплекс призначений роботи з інженерними мережами, зокрема системами водопостачання та водовідведення. Він поєднує в собі геоінформаційну платформу (ГІС) та розрахунково-аналітичну систему (РАС) [8, 9].

"РІКОМ" дає змогу створювати електронні моделі мереж, виконувати гідравлічні розрахунки (виявлення зон з недостатнім або надлишковим напором, перевірка режимів роботи), а також моделювати функціонування систем водовідведення – як напірних, так і самотісних мереж, включно з дощовою каналізацією [10].

Розробники цього програмного комплексу

наголошують на важливості інтеграції ГІС з гідравлічними розрахунками для повноцінного опису інженерних мереж, а також на можливості подальшого підключення зовнішніх систем, таких як білінг, SCADA, системи управління активами тощо [11].

Варто зазначити, що "РІКОМ" є незалежним українським програмним продуктом і не має жодного стосунку до російського програмного забезпечення ZuluHydro, використання якого в Україні є неприйнятним.

Програмний комплекс "ГІДРА" (розробник Вербато Є.Г., Україна) – комп'ютерна програма, розроблена у 2013 році (Свідоцтво № 51037 від 30.09.2013 р., ДСІВ України) на основі відкритого коду програми EPANET.

"ГІДРА" призначена для гідравлічного моделювання водопровідних мереж будь-якої складності та конфігурації у системах водопостачання різної потужності. За наявною інформацією [12], моделі на базі "ГІДРА" успішно впроваджено у понад 57 містах України.

Програма дає змогу вирішувати широкий спектр задач, зокрема:

- визначення джерел економії енергоресурсів;
- забезпечення оптимального тиску в мережі;
- локалізація аварій;
- аналіз наслідків змін у мережі (розширення, пориви);
- оптимізація структури мережі.

"ГІДРА" дозволяє зосередити повну інформацію про систему водопостачання в єдиній базі даних, вести архів змін її стану, оперативно аналізувати різноманітні експлуатаційні та аварійні ситуації, оцінювати вплив несанкціонованих підключень, виявляти ділянки з надмірним або недостатнім тиском, а також моделювати сценарії за принципом "що буде, якщо...".

Важливим аспектом є той факт, що розробка гідравлічної моделі на базі "ГІДРА" передбачає повну інвентаризацію елементів системи, що сприяє упорядкуванню в обліку та виявленню причин втрат води.

EPANET та інші міжнародні програмні комплекси

Поряд із вітчизняними розробками, українські фахівці та підприємства водопровідно-каналізаційного господарства активно застосовують міжнародні програмні продукти. Зокрема EPANET користується популярністю завдяки своїй доступності, відкритому коду та достатньо широкому функціоналу.

Для складніших проєктів, особливо за участі міжнародних консультантів або у рамках проєктів з міжнародним фінансуванням, часто використовуються комерційні пакети типу **WaterGEMS** та **WaterCAD**.

Накопичений практичний досвід свідчить про доцільність використання EPANET для моделювання несприятливих сценаріїв функціонування водопровідних мереж.

Незважаючи на усвідомлення важливості гідравлічного моделювання та використання ГІС-технологій, їх широке та стандартизоване впровадження в Україні наразі стримується, переусім, через відсутність чіткої нормативної бази.

Чинний ДБН В.2.5-74:2013 "Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування" [13] є головним нормативним документом, що регламентує проєктування систем водопостачання в Україні. Проте його положення щодо гідравлічних розрахунків, а особливо щодо комп'ютерного моделювання, є недостатньо деталізованими та не відповідають сучасному рівню розвитку інформаційних технологій.

Для гідравлічних розрахунків (Додаток К ДБН [13]) наводяться емпіричні формули для визначення втрат напору. Ці формули можуть бути корисними для попередніх оцінок або розрахунків на простих ділянках мережі, однак вони не придатні для комплексного моделювання розгалужених мереж у динамічному режимі – що є стандартом сучасної інженерної практики. Також відсутні чіткі рекомендації щодо вибору математичних моделей і розрахункових формул. Наприклад не вказано переваги застосування рівняння Дарсі-Вейсбаха-Колбрука-Уайта, яке забезпечує вищу точність у порівнянні з класичними спрощеними підходами.

Діючі ДБН фактично не містять положень, які б регламентували сучасне комп'ютерне гідравлічне моделювання. Зокрема, відсутні:

- вимоги або рекомендації щодо використання конкретних типів програмного забезпечення;
- регламентація процедур калібрування гідравлічних моделей за даними польових вимірювань – критично важливого етапу, без якого модель не може вважатися достовірною;
- вимоги до валідації відкаліброваних моделей на незалежних наборах даних;
- чіткі критерії точності, яких необхідно досягти при калібруванні моделі для різних цілей (наприклад, розробка генерального плану, робоче проєктування, оперативне управління, створення ГІС);
- вказівки щодо необхідного рівня деталізації моделі залежно від поставлених завдань;
- вимоги до інтеграції гідравлічних моделей з геоінформаційними системами (ГІС),

що є ключовим аспектом сучасного управління інфраструктурою.

Загальні положення ДБН, зокрема п. 5.8 [13] допускають застосування новітніх методів за умови математичного моделювання, проте це формулювання є декларативним і не встановлює конкретних технічних вимог.

Пункт 8.9 [13] стосується необхідності врахування спільної роботи елементів системи, що, по суті, відповідає завданню моделювання, однак не деталізує, способи його реалізації із застосуванням сучасних інструментів та процедур верифікації.

Підпункти 16.1.5, 16.1.6, 16.1.8, 16.6 стосуються питань автоматизації та систем управління, але не розкривають специфіку використання гідравлічних моделей як основи для таких систем.

Зазначені прогалини у нормативному регулюванні призводять до таких наслідків:

- якість створених гідравлічних моделей може суттєво варіюватися, що ускладнює їх порівняння та використання на практиці;
- відсутні єдині критерії для оцінювання та приймання результатів моделювання, що створює неоднозначність у взаємодії між замовниками, проєктувальниками та експлуатаційними організаціями;
- ускладнюється розробка сучасних геоінформаційних систем (ГІС), заснованих на достовірних та актуалізованих гідравлічних моделях;
- існує ризик прийняття неоптимальних проєктних та експлуатаційних рішень через використання невідкаліброваних або недостатньо точних моделей.

Для подолання виявлених прогалин та приведення вітчизняної практики у відповідність до міжнародних стандартів [4,5] необхідне цілеспрямоване удосконалення нормативної бази України. Це може бути реалізовано шляхом внесення змін до чинних будівельних норм (зокрема, ДБН В.2.5-74:2013 та ДБН В.2.5-75:2013) або, що є більш системним підходом, розроблення окремого національного стандарту (ДСТУ) чи комплексу стандартів у

сфері гідравлічного моделювання систем водопостачання та водовідведення.

До ключових напрямів нормативного регулювання доцільно віднести:

- стандартизацію термінології та основних понять, зокрема запровадження чітких визначень таких термінів, як "гідравлічна модель", "калібрування моделі", "валідація моделі", "рівень деталізації моделі", "точність моделі" тощо.

Вимоги до створення гідравлічної моделі мають охоплювати такі аспекти:

- визначення мінімально необхідного переліку вхідних даних, включаючи вимоги до їхньої якості та джерел (ГІС, натурні обстеження, проєктна та виконавча документація);
- рекомендації щодо вибору рівня деталізації моделі залежно від мети моделювання (наприклад, для розроблення схем тепlopостачання та систем водопостачання і водовідведення, проєктування реконструкцій, аналізу аварійних ситуацій, оперативного управління).

Вимоги до окремих елементів системи, зокрема:

- трубопроводів (включаючи методику визначення та оновлення коефіцієнтів шорсткості);
- вузлів (у тому числі методики розподілу попиту та його валідації);
- насосних станцій (вимоги до точності поданих насосних характеристик);
- резервуарів і регулюючої арматури.

Регламентація процесів калібрування та валідації гідравлічних моделей має включати наступні положення:

- встановлення обов'язковості калібрування моделей, що використовуються для прийняття відповідальних проєктних та управлінських рішень;
- опис рекомендованих методик калібрування (ручного, автоматизованого), а також вимог до обсягу та типу польових вимірювань (тисків, витрат, рівнів), необхідних для забезпечення достовірності моделі;
- встановлення обов'язковості валідації відкаліброваної моделі на незалежному наборі

даних;

- визначення чітких критеріїв точності калібрування, включаючи допустимі відхилення розрахункових параметрів від вимірних значень, цільові значення коефіцієнтів кореляції та інші статистичні показники, диференційовані залежно від цілей моделювання (наприклад, для стратегічного планування, оперативного управління, аварійного аналізу тощо).

Вимоги до програмного забезпечення для гідравлічного моделювання повинні включати:

- загальні вимоги до функціональних можливостей програмних комплексів, зокрема підтримку стаціонарного та динамічного моделювання, моделювання якості води, наявність інструментів для калібрування та валідації моделей;

- вимогу використання ліцензійного програмного забезпечення, що забезпечує правомірність застосування та технічну підтримку;

- можливість верифікації алгоритмів розрахунку, зокрема шляхом порівняння з еталонними задачами або результатами інших програмних комплексів;

- пріоритетність підтримки та розвитку вітчизняного програмного забезпечення, що відповідає вимогам безпеки, локального регламентування та забезпечує технічну незалежність.

Інтеграція гідравлічних моделей з ГІС повинна передбачати:

- визначення вимог до структури даних у ГІС, що забезпечують їх сумісність із гідравлічними моделями;

- регламентацію процедур обміну даними між ГІС та моделлю, включаючи створення гідравлічної моделі на основі просторових даних, а також оновлення ГІС за результатами моделювання та калібрування;

- вимоги до моделей реального часу або моделей із регулярним оновленням, побудованих на основі даних з ГІС і SCADA-систем, що використовуються для оперативного управління мережами.

Що стосується документування та звітності, потрібне встановлення чітких вимог до складу та змісту звітної документації за результатами гідравлічного моделювання. Зокрема, звіти мають включати: опис створеної моделі, перелік використаних вхідних даних, опис процесу калібрування і валідації, значення досягнутої точності, а також результати аналізу чутливості параметрів.

Необхідно визначити також кваліфікаційні вимоги до професійної підготовки та кваліфікації фахівців, які виконують роботи з гідравлічного моделювання, включаючи знання у сфері гідравліки, роботи з ГІС, калібрування моделей та інтерпретації результатів.

Впровадження вказаних нормативних змін дозволить:

- створити прозорі та уніфіковані правила для всіх учасників ринку;

- підвищити якість проектних рішень;

- забезпечити ефективніше використання інвестицій у розвиток систем водопостачання та водовідведення;

- покращити надійність їх експлуатації;

- сприяти цифровій трансформації галузі водопостачання.

ВИСНОВКИ

Гідравлічне моделювання є потужним і незамінним інструментом для розв'язання широкого спектра інженерних і управлінських завдань у сфері водопостачання та водовідведення. Міжнародна практика демонструє високий рівень розвитку методологій моделювання, стандартизації процесів калібрування та валідації, а також широке впровадження спеціалізованих програмних комплексів. В Україні ця сфера поки що представлена лише окремими вітчизняними розробками, такими як «РІКОМ» і «ГІДРА» [14-17].

Аналіз чинного українського законодавства, зокрема ДБН В.2.5-74:2013, виявляє суттєве відставання від світових тенденцій. Відсутність чітких нормативних вимог щодо створення, деталізації, калібрування, валідації

та практичного застосування гідравлічних моделей, а також щодо їх інтеграції з геоінформаційними системами (ГІС), стримує ефективно впровадження цих технологій в Україні. Це призводить до ризиків прийняття неоптимальних проєктних рішень, нераціонального використання ресурсів та ускладнює перехід до сучасних методів управління інфраструктурою систем водопостачання і водовідведення.

З огляду на вищезазначене, нагальною потребою є удосконалення національної нормативної бази шляхом розробки та впровадження стандартів, що встановлюють чіткі вимоги щодо гідравлічного моделювання. Такі стандарти мають базуватися на передовому міжнародному досвіді (зокрема, рекомендаціях AWWA), враховувати українські особливості та сприяти:

- підвищенню якості та достовірності гідравлічних розрахунків і моделей;
- обґрунтованому прийняттю проєктних і експлуатаційних рішень;
- ефективному плануванню розвитку й реконструкції систем водопостачання та водовідведення;
- оптимізації енергоспоживання та скороченню втрат води;
- створенню та ефективному використанню геоінформаційних систем на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства;
- підвищенню загальної надійності й ефективності функціонування водопровідно-каналізаційного сектору України.

Інвестування в розробку та впровадження таких нормативних документів, а також у підготовку відповідних фахівців, є ключовим чинником забезпечення сталого розвитку та підвищення конкурентоспроможності вітчизняної галузі водопостачання та водовідведення.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва: Машиностроение, 1975. 479 с.
2. **Чесноков О. В., Калайдо О. В., Колесніков**

В. О. Гідравліка і гідравлічні машини. Луганськ: ЛНУ ім. Тараса Шевченка, 2020. 165 с.

3. **Омельченко О. В., Цвіркун Л. О.** Гідравлічні машини / Донецьк: ДОННУЕТ, 2020. 129 с.
4. **EN 805:2000** Water supply – Requirements for systems and components outside buildings.
5. **ISO 4064, ISO 5167** Міжнародні стандарти з гідравлічних вимірювань витрат і напору.
6. **Rossman L. A.** EPANET 2 Users Manual. United States Environmental Protection Agency. URL: <https://surl.lu/qlkbhz>
7. **AWWA.** M32 Computer Modeling of Water Distribution Systems, Fourth Edition. American Water Works Association.
8. **ТОВ "НП РІКОМ".** Розрахунково-інформаційний комплекс інженерних мереж «РІКОМ». URL: <https://www.rikom.ua/>.
9. **РІКОМ.** Функції РІКОМ - Розрахунково-інформаційний комплекс. URL: <https://rikom.city/funkci%D1%97/>.
10. **ТОВ "НП РІКОМ".** Програмні продукти (РІКОМ S для водовідведення). URL: <https://www.rikom.ua/rikomw/>.
11. **ТОВ "НП РІКОМ".** Для розробки ДСТУ ГІС ВП та ВОДОПОСТАЧАННЯ ВОДОВІДВЕННЯ. URL: <https://surl.lu/thqwwl>
12. **Вербато Є. Г.** Інформаційний лист про програму гідравлічного моделювання "ГІДРА". 2024.
13. **ДБН В.2.5-74:2013.** Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування (зі Зміною № 1). Київ: Мінрегіон України, 2019.
14. **USAID.** Муніципальна енергетична реформа в Україні. Впровадження програмного комплексу для водоканалу в м. Нікополь. URL: <https://media.onova.org.ua/onova-october-stg/uploads/public/640/8f4/e9b/6408f4e9b22df342065502.pdf>.
15. **Впровадження** програмного комплексу для водоканалу в м. Нікополь (1-ий етап) // ОНОВА. URL: <https://onova.org.ua/projects/vprovadzhennia-prohamnoho-kompleksu-dlia-vodokanalu-v-m-nikopol>.
16. **Кравченко О., Потапенко С., Куба Т., Аргатенко Т.** Вимоги до гідравлічного моделювання мереж водопостачання у воєнний час та для управління ризиками ХБРЯ-забруднень // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2023, (45), 32–38. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.32-38>.
17. **Walski T. M., et al.** Advanced Water

Distribution Modeling and Management. Haestad Press. 2003. 82.

REFERENCES

1. **Idelchik, I. E. (1975).** Handbook of Hydraulic Resistance. Moscow: Mashinostroenie, [in Russian]
2. **Chesnokov, O. V., Kalaido, O. V., & Kolesnikov, V. O. (2020).** Hydraulics and Hydraulic Machines. Luhansk: LNU named after Taras Shevchenko. [in Ukrainian]
3. **Omelchenko, O. V., & Tsvirkun, L. O. (2020).** Hydraulic Machines. Donetsk: DONNUET. [in Ukrainian]
4. **EN 805:2000.** Water supply – Requirements for systems and components outside buildings.
5. **ISO 4064, ISO 5167.** International standards for hydraulic measurement of flow and head loss.
6. **Rossman L. A. (2000).** EPANET 2 User's Manual. United States Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://surl.lu/qlkbhz>
7. **AWWA (n.d.)** M32 Computer Modeling of Water Distribution Systems, Fourth Edition. American Water Works Association.
8. **RIKOM (n.d.)** Engineering Networks Computation and Information Complex. Retrieved from <https://www.rikom.ua>
9. **RIKOM (n.d.)** Functions of RIKOM – Computational Information Complex. Retrieved from <https://rikom.city/funkci%D1%97>
10. **RIKOM LLC (n.d.)** Software Products (RIKOM S for wastewater networks). Retrieved from <https://www.rikom.ua/rikomw>
11. **LLC "NP RIKOM" (n.d.)** For the development of DSTU GIS for Water Supply and Wastewater Disposal. Retrieved from <https://surl.lu/thqwwl>
12. **Verbato Y. H. (2024).** Information letter on the hydraulic modeling software “HYDRA”.
13. **Ministry of Regional Development of Ukraine (2019).** DBN V.2.5-74:2013. Water supply. External networks and structures. Basic design principles (with Amendment No. 1). Kyiv. [in Ukrainian]
14. **USAID (n.d.)** Municipal Energy Reform in Ukraine. USAID Project. Implementation of a software suite for the water utility in Nikopol. Retrieved from <https://media.onova.org.ua/onova-october-stg/uploads/public/640/8f4/e9b/6408f4e9b22df342065502.pdf>
15. **ONOVA (n.d.)** Implementation of a software suite for the water utility in Nikopol (Stage 1). Retrieved from <https://onova.org.ua/projects/vprovadzhennia-prohramnoho-kompleksu-dlia-vodokanalu-v-m-nikopol>
16. **Kravchenko, O., Potapenko, S., Kuba, T., & Arhatenko, T. (2023).** Requirements for hydraulic modeling of wartime water supply networks and for CBRN pollution risk management. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (45), 32–38. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.32-38>
17. **Walski, T. M., et al. (2003).** Advanced Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/221936180_Advanced_Water_Distribution_Modeling_and_Management

Modern approaches to hydraulic modeling of water supply and wastewater systems: international experience and prospects for Ukraine

*Oleksandr Kravchenko, Tetiana Kuba,
Oksana Nechypor, Nestan Tavartkiladze*

Abstract: The article presents an in-depth analysis of contemporary international experience in the field of hydraulic modeling of water supply and wastewater systems. It thoroughly examines the fundamental hydraulic principles underlying modeling and their implementation in specialized software packages (including EPANET, WaterGEMS, SewerGEMS, InfoWorks ICM, etc.). Drawing on international guidelines, particularly AWWA M32, special attention is given to model construction requirements, levels of detail (from skeletonized to full-pipe models), and the procedures for calibration and validation of hydraulic models. Commonly accepted accuracy criteria for various engineering tasks are also presented. The study explores domestic experience in using software products, particularly Ukrainian systems such as "RIKOM" and "HYDRA", as well as the development of geographic information systems (GIS) for water utilities. A comprehensive analysis of current Ukrainian legislation in this field, including DBN V.2.5-74:2013, is conducted regarding the existence and completeness of requirements for hydraulic modeling. Significant gaps in the national regulatory framework are identified concerning the standardization of model creation, verification, application, and integration with GIS. The article substantiates the urgent need to improve Ukrainian normative documents to establish clear and modern “rules of the game” in the field of hydraulic modeling during the design, operation, and development of GIS for water and wastewater utilities, which will contribute to enhancing their efficiency and reliability.

Keywords: hydraulic modeling, water supply and wastewater systems, software, EPANET, WaterGEMS, RIKOM, HYDRA, calibration, model validation, modeling accuracy, GIS, pumping stations, network optimization.

Стаття надійшла до редакції 03.07.2025