

УДК 628.12:620.98-048.34

П. С. КІРІЧЕНКО¹, В. В. САВІН², В. А. КОЗАЧИНА^{3*}, П. Б. МАШИХІНА⁴,
В. В. КОЗАЧИНА⁵

¹Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

²Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (098) 424 87 84, ел. пошта savinvv@knu.edu.ua, ORCID 0009-0008-6013-7371

^{3*}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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁴Каф. «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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁵Каф. «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

Оптимізація енергоспоживання насосного обладнання ВНС шляхом підбору сучасних насосів

Мета. Дослідження з визначення оптимального з технічного та економічного погляду варіанту заміни насосного обладнання на прикладі насосної станції другого підйому ВНС–45, що експлуатується у місті Кривий Ріг. **Методика.** Дослідження реалізовано у декілька етапів: аналіз фактичного режиму роботи станції, порівняння технічних характеристик альтернативних насосів, побудова графіків сумісної роботи насосів із системою, статистична обробка результатів і оцінка практичної цінності. Такий підхід дозволив забезпечити комплексність аналізу й достовірність висновків. У роботі застосовано методи гідравлічного розрахунку, графічного моделювання та аналізу паспортних характеристик насосів. Усі параметри аналізувались при середньодобовій витраті води 83,07 м³/год. Результати дослідження показали, що найбільш ефективними є насоси Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100, які забезпечують зниження середньомісячного споживання електроенергії на понад 30 % порівняно з існуючим агрегатом типу Д320–50. **Результати.** Вирішені питання надмірного енергоспоживання об'єктами систем централізованого водопостачання. Значну частину витрат комунальних підприємств становить робота насосного обладнання, яке у більшості випадків є технічно застарілим і функціонує поза межами оптимального режиму роботи та є енергонеефективним. Отримані результати можуть стати основою для подальших досліджень у напрямку впровадження систем автоматичного керування на базі змінних швидкостей обертання насосів та алгоритмів оптимізації. **Наукова новизна.** Розроблений науково обґрунтований підхід до модернізації агрегатів насосного обладнання, яке у більшості випадків є технічно застарілим і функціонує поза межами своєї оптимальної робочої зони, з метою підвищення енергоефективності. **Практична значимість.** Практична цінність дослідження полягає в створенні універсальної інженерної моделі підбору насосного обладнання для міських водопровідних систем, що не потребує зміни гідравлічної схеми або впровадження складних алгоритмів керування. Модель може бути застосована на аналогічних об'єктах без додаткових капіталовкладень у інженерну (трубопровідну) інфраструктуру.

Ключові слова: насосна станція; енергоспоживання; підбір насосів; водопостачання; частотне регулювання

Вступ

За оцінками дослідників Magni et al. (2025) та Abe et al. (2019) [1, 8], до 5 % глобального електроспоживання припадає на системи водопостачання та водоочищення, значну частку

якого формують саме насосні станції. Зростання вартості електроенергії, потреба у скороченні викидів парникових газів, а також виклики енергетичної безпеки стимулюють впровадження енергоефективних рішень у цій сфері. Сучасні наукові підходи акцентують увагу на

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

взаємозв'язку між управлінням подачею води, витратами енергії та характеристиками насосного обладнання. Зокрема, у дослідженнях Sharif et al. (2019) [12] та Yifan Xie et al. (2024) [14] зазначається, що оптимізація гідравлічного режиму насосних систем є одним із найефективніших способів зменшення енергоспоживання в міських водорозподільчих мережах. Це включає як модернізацію самих насосів, так і адаптацію режимів їх роботи відповідно до реальних умов споживання.

Емпіричні дослідження показують помітний ефект від застосування насосів зі змінною частотою обертання. Автори дослідження Salmasi et al. (2022) [11] і Duan et al. (2025) [2] продемонстрували, що дистанційне регулювання швидкості через частотні перетворювачі дозволяє підтримувати оптимальний робочий режим у широкому діапазоні витрат і досягати істотної економії енергії. Паралельно De Tarso (2021) [9] провів польові експерименти із застосуванням насосів зі змінною частотою обертання у системах водопостачання з надлишковою проектною продуктивністю та підтвердили можливість досягнення до 50% економії енергії при роботі насосного обладнання в нижньому діапазоні частот.

Автори Hajgató et al. (2020) [3], Hu S. et al. (2023) [5] та Joo Jin-Gul et al. (2024) [6] досліджують застосування методів «deep reinforcement learning» (глибокого навчання з підкріпленням), які дають змогу реалізувати гнучке управління роботою насосного обладнання, забезпечуючи адаптивне реагування на зміну рівня водоспоживання, одночасно контролюючи енергоспоживання та підтримуючи оптимальний рівень води в резервуарах. Сучасні підходи інтеграції алгоритмів глибокого навчання обіцяють нові результати. В дослідженні Ma Haixiang et al. (2024) [7] автори застосували «multi-agent deep reinforcement learning» для оптимізації графіків роботи насосів із врахуванням фізичних моделей гідравлічної системи та досягли економії 13,4% у міській станції водопостачання.

В Україні питання енергоефективності систем водопостачання також набуло актуальності, хоча локальні публікації з цієї теми значно програють за кількістю міжнародним дослідженням. Тим не менш, зарубіжні дослідження (осо-

бливо із застосуванням глибокого навчання та адаптивного керування) демонструють реальні шляхи зниження витрат енергії насосних станцій на 10–50%.

Мета

Дослідження з визначення оптимального з технічного та економічного погляду варіанту заміни насосного обладнання на прикладі насосної станції другого підйому ВНС–45, що експлуатується у місті Кривий Ріг.

Методика

Дослідження присвячено техніко-економічному обґрунтуванню модернізації насосного обладнання на одній з міських водопровідно-насосних станцій другого підйому, яка експлуатується комунальним підприємством «Кривбасводоканал» у складі централізованої системи водопостачання м. Кривий Ріг. Об'єктом дослідження обрано насосну станцію, яка забезпечує транспортування очищеної питної води до житлового фонду, соціальних об'єктів та промислових підприємств. У зв'язку з підвищенням енергоспоживання існуючого насосного агрегату типу Д320–50, виникла необхідність техніко-економічного обґрунтування доцільності заміни обладнання.

Для оцінки функціонування системи водопостачання та визначення енергоефективності насосного обладнання на об'єкті ВНС–45 було застосовано комплексний підхід, який включав використання п'єзометричних графіків і аналіз сумісної роботи насосів з водопровідною мережею. У рамках дослідження виконано порівняльний аналіз технічних параметрів наявного насосного агрегату типу Д320–50 та низки сучасних проєктованих насосів, серед яких: 100PJM200, Calpeda NMS4 100/400 B, Grundfos NB 65–200/198, MVAe.65–200.A.1100 і Grundfos TP 65–720/2.

Для кожного з досліджуваних насосних агрегатів було проаналізовано такі експлуатаційні характеристики: максимальна та середня витрата води (Q), максимальний та середній створюваний напір (H), відповідне споживання електроенергії (P), а також коефіцієнт корисної дії (η) при типовому робочому навантаженні.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Енергетична ефективність визначалась на основі порівняння середньомісячного споживання електроенергії кожним насосом за умови сталого середнього водоспоживання, яке становить $Q_{\text{сер}} = 83,07 \text{ м}^3/\text{год}$. Розрахунки виконувались із використанням базових рівнянь гідравліки, а також із залученням паспортних характеристик насосного обладнання, наданих виробниками.

Дослідження реалізувалося в кілька послідовних етапів, кожен з яких був спрямований на глибокий аналіз окремих аспектів енергоефективності роботи насосної станції. До основних етапів віднесено: аналіз фактичного режиму роботи ВНС–45, техніко-економічне порівняння проєктованих насосних агрегатів, побудову графічних моделей ефективності та формування висновків щодо практичної доцільності модернізації обладнання.

Результати

Під час проведення першого етапу дослідження здійснено аналіз фактичного режиму роботи насосної станції, що передбачав вивчення добових графіків подачі води, оцінку рівня споживання електроенергії, а також визначення середніх та пікових параметрів навантаження на обладнання. Особливу увагу приділено зіставленню реальних обсягів подачі води із паспортними характеристиками наявного насосного агрегату.

Вихідні експлуатаційні дані насосної станції другого підйому (ВНС–45) свідчать про підвищене енергоспоживання протягом усього календарного року. Дані свідчать, що агрегат функціонує поза зоною оптимального енергетичного навантаження, що обумовлює зниження коефіцієнту корисної дії та перевитрати електроенергії. На основі даних про добове водоспоживання від ВНС–45 у літній період (рис. 1) було визначено добу з максимальним обсягом подачі, за якою побудовано графік погодинної витрати води (рис. 2). Отриманий графік добової нерівномірності навантаження на насосне обладнання є критично важливим фактором для обґрунтованого підбору насосів відповідно до реальних експлуатаційних умов.

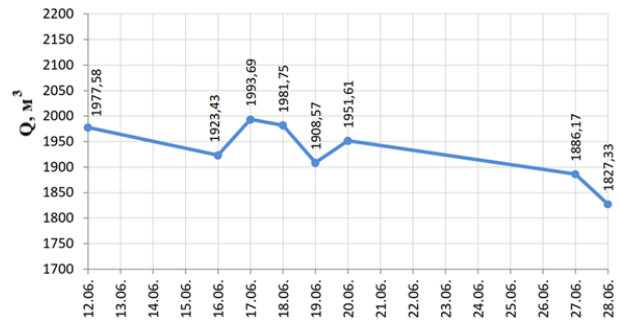


Рис. 1. Графік добового споживання води від ВНС–45 у літній період

Fig. 1. Daily water consumption schedule VNS–45 in the summer

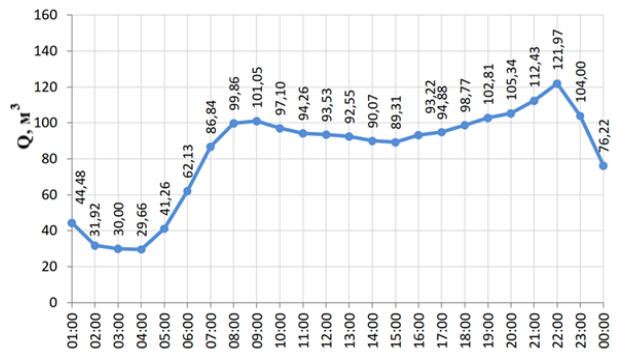


Рис. 2. Графік погодинної витрати води від ВНС–45

Fig. 2. Hourly water consumption schedule from VNS–45

Відповідно до графіків добового водоспоживання визначалась:

– середня витрата води за формулою, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{V_{\text{доб}}}{T} = \frac{1993,69}{24} = 83,07, \quad (1)$$

де $Q_{\text{сер}}$ – середня витрата води, $\text{м}^3/\text{год}$; $V_{\text{доб}}$ – об’єм води, поданої протягом визначеної доби, м^3 ; T – кількість годин у добі;

– максимальна витрата води за формулою, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Q_{\text{макс}} = Q_{\text{рік.макс}} \cdot k_{\text{рік.макс}} = 121,97 \cdot 1,1 = 134,16, \quad (2)$$

де $Q_{\text{год.макс}}$ – максимальна годинна витрата, $\text{м}^3/\text{год}$ (за рис. 1); $k_{\text{рік.макс}}$ – коефіцієнт годинної нерівномірності, $k_{\text{рік.макс}} = 1,1$.

Фактична подача води та навантаження на насосний агрегат відбувається в умовах, що не відповідають оптимальній зоні роботи насосного обладнання типу ДЗ20–50. Відповідно до

технічних характеристик, при середній подачі 83,07 м³/год насос споживає близько 16,46 кВт·год, а його середній коефіцієнт корисної дії становить лише 52,31 %. Такі показники є недостатніми з точки зору енергоефективності, оскільки сучасні насосні агрегати аналогічної потужності за подібних умов експлуатації забезпечують коефіцієнт корисної дії понад 70 %. Рівень споживання електроенергії на одиницю поданої води є економічно недоцільним, а технічні характеристики наявного обладнання свідчать про його моральну та фізичну зношеність.

Таким чином, аналіз фактичного режиму функціонування насосної станції ВНС–45 слугує основою для переходу до техніко-економічного обґрунтування модернізації насосного обладнання з метою підвищення енергоефективності.

На другому етапі дослідження проведено порівняльну характеристику проєктованих насосних агрегатів, яка полягала у техніко-економічному аналізі шести сучасних насосів, що потенційно можуть бути використані як альтернатива існуючому обладнанню типу ДЗ20–50. Основною метою цього етапу було виявлення найефективнішого варіанту, здатного забезпечити необхідні гідравлічні характеристики за умови суттєвого зниження питомого енергоспоживання.

Для аналізу було відібрано шість насосних агрегатів від провідних виробників: 100PJM200, Calpeda NMS4 100/400 В, Grundfos NB 65–200/198, MVAe.65–200.А.1100, Grundfos TP 65–720/2, а також наявний насос ДЗ20–50 як базовий варіант для порівняння. У межах техніко-економічного порівняння для кожного насосного агрегату було проаналізовано гідравлічні та енергетичні характеристики, зокрема: витрату води, створюваний напір, споживану електричну потужність, коефіцієнт корисної дії, а також очікувану економію електроенергії у разі впровадження відповідної моделі. Отримані дані лягли в основу подальшої візуалізації ефективності, статистичного аналізу достовірності результатів та формування практичних висновків щодо доцільності модернізації насосного обладнання (табл. 1). Основні параметри насосів оцінювались при середній витраті води $Q_{\text{сер}} = 83,07 \text{ м}^3/\text{год}$, а також на рівні максимальної витрати $Q_{\text{макс}} = 134,16 \text{ м}^3/\text{год}$.

Таблиця 1

Таблиця техніко-економічних показників роботи проєктованих насосних агрегатів

Table 1

Table of technical and economic performance indicators for the designed pump units

Насосний агрегат	Напір, м	Потужність, кВт·год	ККД, %	Економія, кВт·год/міс
ДЗ20–50 (існуючий)	38,04	16,46	52,31	–
100PJM200, 30 кВт	38,04	13,45	64,02	2 249
Calpeda NMS4 100/400 В, 30 кВт	38,04	13,86	62,13	1 743
Grundfos NB 65–200/198, 22 кВт	38,04	10,93	78,78	3 996
MVAe.65–200.А.1100, 22 кВт	38,04	11,42	75,40	3 576
Grundfos TP 65–720/2, 22 кВт	38,04	13,98	61,59	2 596

Отримані результати свідчать, що найбільш ефективними з огляду на енергозбереження є насосні агрегати Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.А.1100. Вони демонструють ККД на рівні 75 – 79 % та економію електроенергії понад 3 500 кВт·год/міс, що становить зниження енергоспоживання приблизно на 30 % у порівнянні з наявним обладнанням. Навіть у менш ефективних варіантах економія становить понад 2 000 кВт·год/міс, що також може мати позитивний вплив на загальний рівень операційних витрат підприємства, зокрема за рахунок зменшення витрат на електроенергію.

На третьому етапі дослідження було здійснено графічну інтерпретацію ефективності роботи насосного обладнання шляхом побудови характеристик сумісної роботи системи ВНС–45 з кожним із проєктованих насосних

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

агрегатів. Аналіз отриманих графіків засвідчив, що фактичний режим функціонування наявного агрегату Д320–50 виходить за межі зони оптимального коефіцієнта корисної дії. Натомість нові проєктовані моделі демонструють роботу, що наближена до їх номінальних характеристик за умови середньої витрати води $Q_{\text{серед}} = 83,07 \text{ м}^3/\text{год}$, що забезпечує більш стабільну подачу води й зменшення енергетичних витрат.

Для наочного порівняння питомого електроспоживання було також побудовано стовпчикову діаграму (рис. 3), яка чітко демонструє зниження навантаження на електромережу при впровадженні насосів типу Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100.

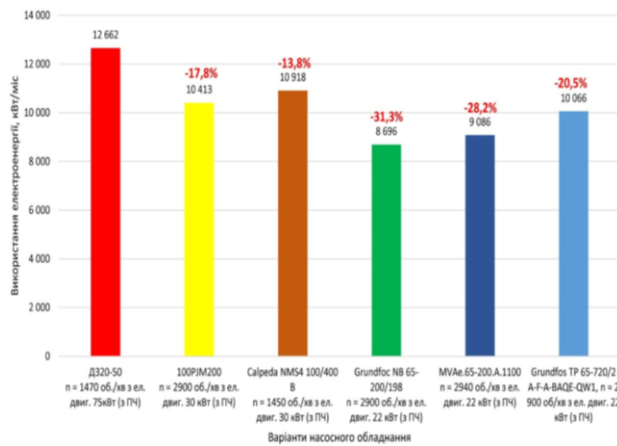


Рис. 3. Загальне використання електричної енергії насосними агрегатами

Fig. 3. Total use of electrical energy by pumping units

Графічне представлення результатів підтверджує техніко-економічну доцільність заміни існуючого обладнання та дає змогу швидко і наочно оцінити енергетичні переваги кожного з розглянутих варіантів модернізації.

Результати дослідження мають істотне прикладне значення у контексті впровадження енергоефективних технічних рішень для об'єктів централізованого водопостачання, особливо в умовах нестабільного енергозабезпечення, обмежених ресурсів та загроз довготривалих аварій на енергетичних мережах. Проведене техніко-економічне порівняння сучасних насосних агрегатів із базовим насосом, що експлуатується на ВНС–45, дало змогу визначити реальні можливості зниження енергоспоживання без зміни гідравлічної схеми системи.

Запропоновані до впровадження моделі насосів Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100 дозволяють скоротити енергоспоживання на понад 30 % у порівнянні з наявним обладнанням. При щомісячній економії 3 500 – 4 000 кВт·год, річна економія електроенергії перевищує 45 000 кВт·год, що потенційно відповідає понад 200 000 грн знижених витрат для підприємства за актуальними тарифами.

Окрім безпосередньої фінансової вигоди, модернізація насосного обладнання сприяє зниженню навантаження на міські енергетичні мережі, зменшенню пускових струмів, стабілізації тиску в системі водопостачання та підвищенню надійності й адаптивності роботи станції у години пікового навантаження.

Отримані результати дослідження, а саме зниження енергоспоживання внаслідок заміни насосного агрегату, знаходять підтвердження у сучасній фаховій літературі. У дослідженні Salmasi et al. (2022) [11] автори оцінювали ефективність насосів зі змінною частотою обертання у зрошувальних системах. Вони показали, що середній ККД покращується на 18,7 %, а енергоспоживання зменшується до 57,6 % порівняно з насосами постійної частоти. При цьому економія в нашому випадку склала близько 30 %, що відповідає цим результатам, хоча масштаби застосування дещо відрізняються.

Теоретична можливість зниження енергоспоживання насосів до 70 % за умови динамічного управління напором була продемонстрована в роботі Hieninger et al. (2021) [4]. Втім, у практичних умовах досягнута економія становила не більше 35 %, що підтверджує реалістичність і обґрунтованість запропонованої нами методики.

З дослідження Truettner et al. (2022) [13] випливає, що впровадження насосів зі змінною швидкістю може дати як суттєву економію, так і нульовий ефект, залежно від гідравлічної конфігурації системи. У моделюванні 15 водопровідних систем лише частина з них забезпечила економічну доцільність впровадження частотного регулювання за критерієм витрат протягом усього життєвого циклу насосного обладнання. Натомість досліджувана нами система, яка є однооб'єктною зі стабільним та чітко визначеним режимом подачі води, належить до типу, де використання змінної частоти обер-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

тання забезпечує виражений ефект підвищення енергоефективності.

Автори Salama et al. (2024) [10] провели розрахунок очисної станції питної води та виконали порівняння режимів роботи насосного обладнання зі змінною та постійною частотою обертання. Хоча наше дослідження не передбачало впровадження частотного регулювання, а базувалося на повній заміні насосного агрегату з урахуванням паспортних характеристик, отримані результати з енергозбереження (понад 30 %) є співмірними з ефектом, досягнутим у Salama et al. (2024) [10] шляхом встановлення інверторного приводу.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблений науково обґрунтований підхід до модернізації агрегатів насосного обладнання, яке у більшості випадків є технічно застарілим і функціонує поза межами своєї оптимальної робочої зони, з метою підвищення енергоефективності.

Висновки

Розроблений комплекс чисельних моделей для рішення наступних задач:

Проведене техніко-економічне обґрунтування показало, що існуючий насосний агрегат типу Д320–50, який експлуатується на ВНС–45, характеризується високим рівнем споживання електроенергії при відносно низькому коефіцієнті корисної дії (ККД $\approx 52\%$), що є неприйнятним в умовах обмежених енергетичних ресурсів і зростаючих тарифів. За результатами техніко-економічного порівняння шести проєктованих насосних агрегатів встановлено, що найбільшу енергоефективність демонструють

моделі Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100. Їх впровадження дозволяє знизити середньомісячне споживання електроенергії до рівня 8 700 – 9 100 кВт, що забезпечує економію до 31 % без зміни гідравлічної схеми системи.

Ключовими технічними рішеннями, що дозволяють досягти енергоощадного ефекту, є: використання насосного обладнання з адаптованими гідравлічними характеристиками; впровадження перетворювачів частоти для забезпечення змінного режиму роботи; точний розрахунок необхідного напору відповідно до поверховості будівель та гідравлічних втрат у мережі.

Результати дослідження можуть бути використані комунальними підприємствами, енергоменеджерами, інженерними організаціями та експлуатаційними службами для обґрунтованого підбору насосного обладнання з урахуванням реального гідравлічного режиму, обсягів подачі, режимної змінності навантаження та вимог до енергоефективності. Отримана модель також може бути адаптована для попередньої оцінки доцільності впровадження частотного регулювання або комплексної модернізації на інших об'єктах систем водопостачання з аналогічними умовами експлуатації.

Перспективами подальших досліджень є розробка математичних моделей для автоматизованого підбору насосного обладнання з урахуванням режимної змінності споживання, впровадження алгоритмів адаптивного керування на базі машинного навчання, а також масштабування результатів на інші об'єкти систем водопостачання в регіонах із подібними експлуатаційними умовами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abe B. T., Shrivastava P., Moloi K. A review of energy consumption in water supply systems. *2019 IEEE AFRICON*. 2019. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/africon46755.2019.9133888> A
2. Duan B., Gao J., Cao H., Hu S. Energy-Efficient Management of Urban Water Distribution Networks Under Hydraulic Anomalies: A Review of Technologies and Challenges. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 11. Art. 2877. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112877>
3. Hajgató G., Paál G., Gyires-Tóth B. Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization of Pumps in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2020. Vol. 146, Iss. 11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001287](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001287)

4. Hieninger T., Goppelt-Schneider F., Schmidt-Vollus R., Schlücker E. Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes. *Energy Efficiency*. 2021. Vol. 14, Iss. 2. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5>
5. Hu S., Gao J., Zhong D., Wu R., Liu L. Real-Time Scheduling of Pumps in Water Distribution Systems Based on Exploration-Enhanced Deep Reinforcement Learning. *Systems*. 2023. Vol. 11, Iss. 2. Art. 56. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11020056>
6. Joo J.-G., Jeong I.-S., Kang S.-H. Deep Reinforcement Learning for Multi-Objective Real-Time Pump Operation in Rainwater Pumping Stations. *Water*. 2024. Vol. 16, Iss. 23. Art. 3398. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16233398>
7. Ma H., Wang X., Wang D. Pump Scheduling Optimization in Urban Water Supply Stations: A Physics-Informed Multiagent Deep Reinforcement Learning Approach. *International Journal of Energy Research*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/9557596>
8. Magni M., Jones E. R., Bierkens M. F. P., van Vliet M. T. H. Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*. 2025. Vol. 277. Art. 123245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245>
9. Mendonça K. H., Gomes H. P., Villanueva J. M. M., Bezerra S. de T. M. Performance of oversized pumps controlled by variable frequency drives in water supply systems. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2022. Vol. 16, No. 2. P. 186–192. DOI: <https://doi.org/10.4090/juee.2022.v16n2.186-192>
10. Salama M. A. E., El-Naggar N. M., Abu-Zaid S. Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 27728. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z>
11. Salmasi F., Abraham J., Salmasi A. Evaluation of variable speed pumps in pressurized water distribution systems. *Applied Water Science*. 2022. Vol. 12, Iss. 3. Art. 51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01577-8>
12. Sharif M. N., Haider H., Farahat A., Hewage K., Sadiq R. Water-energy nexus for water distribution systems: a literature review. *Environmental Reviews*. 2019. Vol. 27, No. 4. P. 519–544. DOI: <https://doi.org/10.1139/er-2018-0106>
13. Truettner C. B., Barkdoll B. D. Economic feasibility analysis of variable-speed pumps by simulating 15 multiple water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2022. Vol. 71, Iss. 5. P. 664–670. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.032>
14. Xie Y., Wu Y., Jin Y., Li Y., Zhao B., Li X., Ba Z., Liu S. Energy-efficient and reliable coordinated scheduling for water distribution systems: enhancing hydraulic conditions and water quality. *AQUA–Water Infrastructure, Ecosystems and Society*. 2024. Vol. 73, Iss. 11. P. 2229–2241. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.365>

P. S. KIRICHENKO¹, V. V. SAVIN², V. A. KOZACHYNA^{3*}, P. B. MASHYKHINA⁴,
V. V. KOZACHYNA⁵

¹Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

²Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (098) 424 87 84, e-mail savinvv@knu.edu.ua, ORCID 0009-0008-6013-7371

^{3*}Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁴Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁵Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

Optimization of Energy Consumption of Pumping Equipment of the WPS by Selecting Modern Pumps

Purpose. Research to determine the optimal, from a technical and economic point of view, option for replacing pumping equipment using the example of the second-lift pumping station VNS–45, operated in the city of Kryvyi Rih. **Methodology.** The study was implemented in several stages: analysis of the actual operating mode of the station, comparison of technical characteristics of alternative pumps, construction of graphs of the combined operation

of pumps with the system, statistical processing of results and assessment of practical value. This approach allowed to ensure the complexity of the analysis and reliability of the conclusions. The work used methods of hydraulic calculation, graphic modeling and analysis of the passport characteristics of pumps. All parameters were analyzed at an average daily water flow of 83.07 m³/h. The results of the study showed that the most effective are the Grundfos NB 65–200/198 and MVAe.65–200 A.1100 pumps, which provide a reduction in average monthly electricity consumption by more than 30% compared to the existing unit of the D320–50 type. **Findings.** The issues of excessive energy consumption by centralized water supply system facilities have been resolved. A significant part of the costs of utility companies is the operation of pumping equipment, which in most cases is technically outdated and operates outside the optimal operating mode and is energy inefficient. The results obtained can become the basis for further research in the direction of implementing automatic control systems based on variable pump rotation speeds and optimization algorithms. **Originality.** A scientifically based approach has been developed to modernize pumping equipment units, which in most cases are technically outdated and operate outside their optimal operating range, in order to increase energy efficiency. **Practical value.** The practical value of the research lies in the creation of a universal engineering model for the selection of pumping equipment for urban water supply systems, which does not require changing the hydraulic scheme or implementing complex control algorithms. The model can be applied to similar facilities without additional capital investments in engineering (pipeline) infrastructure.

Key words: pumping station; energy consumption; pump selection; water supply; frequency control

REFERENCES

1. Abe, B. T., Shrivastava, P., & Moloi, K. (2019). A review of energy consumption in water supply systems. *2019 IEEE AFRICON*, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/africon46755.2019.9133888> (in English)
2. Duan B., Gao, J., Cao, H., & Hu, S. (2025). Energy-Efficient Management of Urban Water Distribution Networks Under Hydraulic Anomalies: A Review of Technologies and Challenges. *Energies*, 18(11), 2877. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112877> (in English)
3. Hajgató, G., Paál, G., & Gyires-Tóth, B. (2020). Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization of Pumps in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(11). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001287](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001287) (in English)
4. Hieninger, T., Goppelt-Schneider, F., Schmidt-Vollus, R., & Schlücker, E. (2021). Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes. *Energy Efficiency*, 14(2), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5> (in English)
5. Hu, S., Gao, J., Zhong, D., Wu, R., & Liu, L. (2023). Real-Time Scheduling of Pumps in Water Distribution Systems Based on Exploration-Enhanced Deep Reinforcement Learning. *Systems*, 11(2), 56. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11020056> (in English)
6. Joo, J.-G., Jeong, I.-S., & Kang, S.-H. (2024). Deep Reinforcement Learning for Multi-Objective Real-Time Pump Operation in Rainwater Pumping Stations. *Water*, 16(23), 3398. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16233398> (in English)
7. Ma, H., Wang, X., & Wang, D. (2024). Pump Scheduling Optimization in Urban Water Supply Stations: A Physics-Informed Multiagent Deep Reinforcement Learning Approach. *International Journal of Energy Research*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/9557596> (in English)
8. Magni, M., Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2025). Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*, 277, 123245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245> (in English)
9. Mendonça, K. H., Gomes, H. P., Villanueva, J. M. M., & Bezerra, S. de T. M. (2022). Performance of oversized pumps controlled by variable frequency drives in water supply systems. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 16(2), 186-192. DOI: <https://doi.org/10.4090/juee.2022.v16n2.186-192> (in English)
10. Salama, M. A. E., El-Naggar, N. M., & Abu-Zaid, S. (2024). Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive. *Scientific Reports*, 14, 27728. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z> (in English)
11. Salmasi, F., Abraham, J., & Salmasi, A. (2022). Evaluation of variable speed pumps in pressurized water distribution systems. *Applied Water Science*, 12(3), 51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01577-8> (in English)
12. Sharif, M. N., Haider, H., Farahat, A., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Water-energy nexus for water distribution systems: a literature review. *Environmental Reviews*, 27(4), 519-544. DOI: <https://doi.org/10.1139/er-2018-0106> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

13. Truettner, C. B., & Barkdoll, B. D. (2022). Economic feasibility analysis of variable-speed pumps by simulating 15 multiple water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 71(5), 664-670. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.032> (in English)
14. Xie, Y., Wu, Y., Jin, Y., Li, Y., Zhao, B., Li, X., Ba, Z., & Liu, S. (2024). Energy-efficient and reliable coordinated scheduling for water distribution systems: enhancing hydraulic conditions and water quality. *AQUA–Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(11), 2229-2241. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.365> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.12.2025

Рекомендовано до публікації: 05.01.2026

Дата публікації: 28.03.2026