

УДК 622.692:519.87

DOI 10.30837/bi.2025.2(103).18

А. В. Палєєв¹, В. Г. Котух², Ю. Ю. Гусєва³, К. М. Палєєва⁴¹ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, artem.palieiev@kname.edu.ua,
ORCID iD: 0009-0000-6044-0786²ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, volodimir.kotuh@kname.edu.ua,
ORCID iD: 0000-0002-6679-8620³ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, yulia.guseva@kname.edu.ua,
ORCID iD: 0000-0001-6992-543X⁴ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, katelyna.palieieva@kname.edu.ua,
ORCID iD: 0000-0001-6004-2331

АНАЛІЗ І ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ РЕГУЛЮВАННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ В ГАЗОТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ УКРАЇНИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

У статті проведено аналіз і порівняння сучасних методів математичної підтримки процесів регулювання нерівномірності споживання природного газу в газотранспортній системі України, що функціонують в умовах підвищеної невизначеності, зумовленої воєнними діями та змінами на енергетичному ринку. Визначено основні фактори невизначеності, що впливають на стабільність та ефективність функціонування газотранспортної системи. Проаналізовано існуючі підходи до прогнозування споживання газу, способи покриття сезонної, добової та годинної нерівномірності, надано оцінку їх техніко-економічної ефективності. Запропоновано використання комбінованих методів регулювання, які поєднують стохастичне моделювання та цифровий моніторинг стану систем з урахуванням воєнних ризиків і невизначеності попиту. Результати дослідження можуть бути використані при оптимізації режимів транспортування газу, підвищенні енергетичної стійкості регіональних систем газопостачання, плануванні резервів та розробці моделей адаптивного управління для кризових умов.

ГАЗОРОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ, НЕРІВНОМІРНІСТЬ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, РЕЗЕРВУВАННЯ, БУФЕРНІ СПОЖИВАЧІ

A. V. Paleyev, V. G. Kotukh, Yu. Yu. Huseva, K. M. Paleyeva. Analysis and comparison of methods for mathematical support in regulating gas consumption irregularities in Ukraine's gas transportation system under conditions of uncertainty. The article analyses and compares mathematical methods for supporting the regulation of gas consumption irregularities in Ukraine's gas distribution system under conditions of uncertainty. The study highlights the growing instability of Ukraine's energy sector, which is caused by wartime destruction of infrastructure, fluctuations in demand, and shifts in the consumer base. The authors systematize long-term and short-term approaches to balancing gas consumption, including underground gas storage, the use of buffer consumers, and pressure-based storage in pipelines. Mathematical dependencies for evaluating seasonal, daily, and hourly unevenness are presented. The proposed integrated decision-support approach combines stochastic and scenario modelling methods to improve the reliability and adaptability of gas supply systems. Practical recommendations are provided for optimising gas transportation and storage under uncertain conditions. The results obtained can be used in planning gas supply schemes, improving energy security, and developing intelligent systems for forecasting and regulating gas consumption.

GAS DISTRIBUTION NETWORKS, GAS CONSUMPTION IRREGULARITY, UNCERTAINTY, MATHEMATICAL MODELING, ENERGY SECURITY, GAS RESERVING, BUFFER CONSUMERS.

Вступ

В умовах сучасного розвитку техніки та технологій надійність та стабільність роботи енергетичної системи є однією з найважливіших, але, водночас, і однією з найуразливіших складових безпеки будь-якої країни [1]. Як зазначено в [2], формування ефективної системи енергетичної безпеки є «...основним показником розвитку національної економіки країни...» та «...визначається внеском усіх її складових: екологічної, наукової, інформаційної та інших сфер життя країни чи території, регіону».

Робота енергетичної системи відбувається в умовах змін зовнішнього середовища, мінливості геополітичних процесів, зміни економічних та соціальних факторів, що безпосередньо впливають на її функціонування,

тобто в умовах невизначеності. Це створює передумови для зростання вразливості енергетичного сектора, оскільки ускладнює довгострокове планування, підвищує ризики порушення стабільності постачання енергоносіїв і потребує запровадження системного управління ризиками, спрямованого на підвищення стійкості та гнучкості енергетичної інфраструктури.

З 2022 року енергетичний сектор України зазнав значних змін. З одного боку, через скорочення промислового виробництва, міграцію населення та загальний економічний спад відбулося зниження споживання енергії. З іншого боку, внаслідок воєнних дій було пошкоджено (а часом і повністю зруйновано) велику кількість об'єктів енергетичної інфраструктури. Усе це стало серйозним випробуванням для енергетичної галузі

нашої країни, спричинивши загострення проблем енергетичної безпеки та збільшивши рівень невизначеності в її роботі [3].

До війни основними видами палива в енергетиці виступали вугілля та торф (25,2 %). Друге місце займав природний газ (23,9 %) [3]. Однак, втрата вугілля як важливого джерела енергії, що відбулася внаслідок воєнних дій на Донбасі, а також наявність в українських надрах значних запасів природного газу, вивела газову галузь на передові позиції з точки зору забезпечення енергетичної стабільності держави [1]. Тому важливим стає питання забезпечення надійності роботи газотранспортної системи України.

На сьогодні функціонування газотранспортної системи України відбувається в умовах значної та постійно зростаючої невизначеності, зумовленої як глобальними енергетичними процесами, так і внутрішніми соціально-економічними та воєнно-політичними аспектами. Можна виділити наступні основні фактори невизначеності, що впливають на роботу газотранспортної системи в умовах війни:

- фізичні ризики – руйнування або пошкодження об'єктів газотранспортної інфраструктури внаслідок бойових дій, обстрілів, мінування територій та обмеження доступу до об'єктів експлуатації;

- енергетична несталість – коливання обсягів транзиту, зміна джерел постачання природного газу, потреба у швидкій перебудові маршрутів транспортування та перерозподілу потоків;

- техніко-економічні ризики – нестабільність цін на газ, коливання попиту та про-позиції, а також ризики неплатоспроможності споживачів і партнерів; обмеженість у постачанні матеріалів, обладнання та комплектуючих; зниження кадрового потенціалу через мобілізацію, евакуацію або руйнування виробничих баз;
- правові та організаційні фактори – постійні зміни у законодавчій базі, адаптація до європейських стандартів енергетичного ринку, необхідність узгодження технічних рішень із міжнародними операторами, тощо.

Підвищення рівня ризиків в роботі газотранспортної системи в умовах війни потребує переосмислення підходів до планування, управління та технічного забезпечення цих систем. Ключовим завданням стає забезпечення надійності, гнучкості та адаптивності систем газопостачання, організація їх стабільної роботи за мінливих, непередбачуваних та високоризикових обставин. Це вимагає впровадження сучасних методів прогнозування, моделювання ризиків та управління невизначеністю (застосування підходів сценарного аналізу, стохастичного моделювання, цифрового моніторингу, тощо).

1. Постановка завдання

У сучасних досліджень приділяється увага питанням прогнозування споживання газу та аналізу методів, що застосовуються для прогнозування [4, 5]. Так, згідно дослідженням, наведеним в [5], найбільш поширеним

методом є нейронні мережі. Також приділяється увага питанням керування невизначеності в системах газопостачання [6, 7]. Однак недостатньо висвітленими залишаються питання техніко-економічного моделювання нерівномірності добового/годинного споживання. Крім того в розглянутих моделях не враховуються умови невизначеності в роботі систем газопостачання, викликані саме воєнними діями.

Тому, попри наявні дослідження щодо методів та моделей управління системами газопостачання, недостатньо досліджено математичні методи оцінювання добової та годинної нерівномірності в умовах стохастичної невизначеності, спричиненої воєнними ризиками. Тому актуальним завданням є розроблення підходів до оцінювання та регулювання нерівномірності газоспоживання на основі методів математичної підтримки прийняття рішень.

Метою статті є обґрунтування теоретичних і практичних засад підвищення ефективності функціонування газотранспортної системи України в умовах невизначеності шляхом аналізу методів покриття та вирівнювання нерівномірності газоспоживання. Для досягнення поставленої мети вирішуватимуться такі завдання:

1. Проаналізувати фактори невизначеності, що впливають на роботу газотранспортної системи України в умовах війни.

2. Визначити економічні та технічні наслідки нерівномірності газоспоживання.

3. Систематизувати існуючі методи та засоби покриття сезонної, добової й годинної нерівномірності споживання газу.

4. Надати рекомендації щодо напрямів підвищення стійкості газопостачання в Україні.

2. Викладення основного матеріалу

Нерівномірність споживання властива усім видам палива, але тільки для газу усунення її впливу на економічні показники розподілу і використання палива перетворюється в складну проблему. Так, наприклад, тверде і рідке паливо (вугілля, мазут і т. п.) відносно легко піддаються складуванню, однак для газу це складно, а іноді і неможливо. Тому, за відсутності спеціальних заходів, графіки видобування, транспортування і споживання газу повинні бути синхронізовані, що викликає необхідність розрахунку системи «промисел – газопроводи» по максимуму газоспоживання і обумовлює її роботу на оптимальному режимі.

На сьогодні розповсюджені два підходи до проблеми подолання економічних наслідків нерівномірності газоспоживання і, відповідно, два види заходів її реалізації:

- покриття нерівномірності газоспоживання або різними методами акумуляції надлишків газу в періоди зниженої його витрати, або іншими методами, наприклад, створенням резервів газу для його використання в періоди підвищеного попиту;

– вирівнювання нерівномірності газоспоживання шляхом ущільнення його графіку [8].

У загальному випадку, заходи першого виду забезпечують можливість оптимізації режимів видобування і транспортування газу без зміни графіків роботи цілорічних його споживачів. Заходи ж другого виду оснований саме на зміні режимів газоспоживання.

Зазвичай покриття нерівномірності газо-споживання або її вирівнювання по різному впливає на техніко-економічні показники систем газопостачання. Це також створює передумови для оптимізації споживання газу і забезпечує підвищення використання основних фондів, а також зниження собівартості і питомих капіталовкладень в систему газопостачання. Так, наприклад, міські газорозподільні мережі розраховуються на сумісний максимум газоспоживання. Це створює позитивний ефект і умови для зменшення діаметрів таких систем при тій самій річній витраті газу.

У загальному випадку вирішальна роль в подоланні наслідків нерівномірності газоспоживання належить буферним споживачам – регуляторам, що отримують газ під час «провалів» графіку газоспоживання. Зазвичай в якості буферних виступають крупні споживачі палива, які отримують газ безпосередньо з газотранспортної системи, і, в цілому, в межах крупного територіального району вони ущільнюють графік газоспоживання. Іноді буферними споживачами виступають промислові підприємства, розміщені в межах території населеного пункту (міста), які отримують газ через газорозподільні системи та сприяють ущільненню суміщеного графіку газоспоживання міста. Тому їх використання можна розглядати як заходи другого виду.

Основними способами покриття нерівномірності газоспоживання є підземне зберігання газу під тиском; використання буферних споживачів регуляторів, що споживають газ під час сезонних «провалів» графіка навантаження; використання акумулюючої ємності кінцевих ділянок систем газопостачання; зберігання газу в трубах під тиском, тощо [9, 10]. Кожен спосіб має свою оптимальну сферу застосування і різну, залежно від місцевих умов, ступінь економічної ефективності. При виборі напрямків покриття нерівномірності газу споживання необхідно враховувати особливості трьох видів нерівності поставок газу: сезонної (місячної), добової і годинної. Так, сезонна нерівномірність потребує для свого покриття крупних запасів газу влітку, в період зниженого попиту, а добова і, особливо, година – порівняльно незначних запасів газу, але більшої інтенсивності їх відбору та продуктивності сховищ.

У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз розглянутих методів. При систематизації матеріалу було використано інструменти штучного інтелекту (ChatGPT); остаточне наповнення, редагування та наукова верифікація даних таблиці 1 виконані авторами.

Таблиця 1 демонструє, що жоден із методів не є

універсальним. Найвищу адаптивність в умовах підвищеної невизначеності забезпечують комбіновані підходи, які суміщають можливості довготривалого сезонного регулювання (підземні сховища газу), короткочасного добового балансування (буферні споживачі) та швидкого годинного реагування (лінійні ємності й акумулюючі ділянки трубопроводів).

Основними параметрами режиму газоспоживання, які необхідні для правильного вибору напрямків з покриття нерівномірності є: загальні коефіцієнти сезонної (місячної), добової та годинної нерівномірності, що визначають продуктивність різного роду газосховищ. З цим пов'язані також об'єми тимчасового надлишку газу, що утворюються при рівномірній його подачі в період зменшення попиту на газ, недостачі газу в періоди підвищеного попиту, а також об'єм складів резервного палива у буферних споживачів.

З огляду на підвищену варіабельність параметрів газоспоживання в умовах воєнних ризиків доцільним є застосування елементів стохастичного моделювання. Випадковими величинами можуть виступати добові й годинні навантаження, пікові відбори, зовнішня температура, параметри тиску та ймовірність аварійних збурень. Стохастичний підхід дозволяє описувати розподіли цих параметрів і оцінювати їхній вплив на показники нерівномірності. Вихідною величиною такого моделювання є очікуване та граничне значення нерівномірності для різних сценаріїв, що підвищує точність вибору оптимальних методів її покриття.

Загальний об'єм тимчасових нестач газу за рік у відсотках від річної витрати може бути визначений за повного використання пропускної здатності систем газопостачання за формулою [11, 12]:

$$\alpha = \frac{\sum(K > 1) - \sum(n > 1)}{12 \cdot 10^{-2}}, \quad (1)$$

а під час проектування систем газопостачання з резервом пропускної здатності за формулою [11, 12]:

$$\alpha = \frac{\sum(K > A) - A \sum(n > A)}{12 \cdot 10^{-2}}, \quad (2)$$

де α – частка об'єму нерівномірності, що підлягає покриттю, у загальному об'ємі газоспоживання за рік, %; $\sum(K > 1)$, $\sum(K > A)$ – сума часткових коефіцієнтів місячної нерівномірності зі значеннями, що перевищують відповідно 1 або A ; $\sum(n > 1)$, $(n > A)$ – число часткових коефіцієнтів нерівномірності, які, відповідно, перевищують 1 або A ; A – показник, зворотній величини резерву системи газопостачання $A = \frac{1}{1 - q}$; q – частка резерву в загальній пропускній здатності в системі газопостачання; n – число місяців з $K > 1$ або $K > A$.

Враховуючи різне число днів в місяцях року, більш точне значення α можна отримати [11, 12]:

Таблиця 1

Порівняння методів покриття та регулювання нерівномірності газоспоживання в умовах невизначеності

Метод	Тип перекир- ваної нерівно- мірності	Переваги	Недоліки	Умови ефективного застосування	Чутливість до різних видів невизначеності
Підземні газо- ві сховища у водоносних пластах	Сезонна (місячна)	Великий обсяг збері- гання; стабільний дебіт; здатність вирівнювати газопостачання протя- гом тривалих періодів	Висока вартість спорудження; складність гео- логічних умов; довгий час реакції	Наявність відпо- відних геологічних структур; віддале- ність від зон ризику	Середня: фізичні ризики впли- вають помірно; економічні – мінімально
Підземні газо- ві сховища у виснажених газових родо- вищах	Сезонна та частково до- бова	Низькі капітальні ви- трати; швидший запуск; висока надійність	Обмежені об'єми; залеж- ність від харак- теристик пласта	Наявність родовищ поблизу споживача; стабільний тиск у системі	Низька: міні- мально піддають- ся впливу через захищеність і автономність
Буферні спо- живачі-регуля- тори	Добова та частково годинна	Висока гнучкість; швидке реагування; мінімальні витрати на впровадження	Потреба в аль- тернативному паливі; залеж- ність від готов- ності споживачів	Наявність у регіоні великих спожива- чів із резервним паливом	Висока: значний вплив фізичних та техніко-еконо- мічних ризиків
Акумулююча ємність кін- цевих ділянок систем газо- постачання	Годинна	Забезпечує локальне згладжування піків; про- ста реалізація	Обмежений об- сяг акумулюван- ня; залежність від тиску	Стабільний висо- кий тиск; близь- кість до зони спо- живання	Середня: техно- логічні ризики помітно вплива- ють, фізичні – менше
Зберігання газу в трубах під тиском (лі- нійні ємності)	Годинна	Найнижча собівартість; миттєва реакція; ви- користовується у містах біля магістралей	Малі об'єми; обмеження за тиском; вимоги до безпеки	Розміщення між компресорними станціями; міські зони зі змінним попитом	Висока: чутли- вість до фізичних ризиків (пошко- дження труб)
Вирівнюван- ня графіку споживання (організаційні заходи)	Добова і частково сезонна	Дуже низька вартість; можливість значного ущільнення графіка	Потребує коор- динації великої кількості спо- живачів	Розвинена система диспетчеризації; наявність керован- них споживачів	Висока: органі- заційна неста- більність, непро- гнозовані зміни попиту
Комбіновані методи	Сезонна, добова і годинна	Найбільша надійність; висока стійкість до пікових навантажень; можливість оптимізації	Підвищена складність; по- треба в цифрово- му моніторингу та прогнозуванні	Цифрові системи контролю; інтегра- ція SCADA; наяв- ність інтелектуаль- них алгоритмів	Низька або се- редня: стійкі

– за повного використання пропускної здатності системи газопостачання:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{H_i}^M > 1) \cdot Z_i}{365 \cdot 10^{-2}}, \quad (3)$$

– за проектування системи газопостачання з резервом пропускної здатності:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{H_i}^M > A) \cdot Z_i}{365 \cdot 10^{-2}}, \quad (4)$$

де $K_{H_i}^M$ – частковий коефіцієнт місячної нерівномірності i -го місяця з $K_{H_i}^M > 1$ за повного використання пропускної здатності системи газопостачання і з $K_{H_i}^M > A$ за проектування такої системи з резервом пропускної здатності; Z_i – число днів в i -му місяці з $K_{H_i}^M > 1$ або $K_{H_i}^M > A$; n – число місяців з $K_{H_i}^M > 1$ або $K_{H_i}^M > A$.

Виходячи з обраних напрямків дослідження обрано способи покриття нерівномірності споживання газу в

системах газопостачання. Їх умовно можна поділити на дві групи [11, 12]:

– засоби довготривалого регулювання для покриття сезонної (місячної) нерівномірності завдяки використанню підземних сховищ надлишків газу;

– засоби короточасного регулювання, здатні повністю або частково покривати добову та годинну нерівномірність, використовуючи крупні опалювальні і промислові котельні, кінцеві ємності ділянок систем газопостачання, тощо.

Якщо покриття нерівномірності газоспоживання в системах газопостачання здійснюється з використанням засобів короткострокового регулювання, то в цьому випадку необхідно роздільно визначити ємності для акумуляції запасів газу, призначених для покриття різних видів нерівномірності.

Розв'язання цієї задачі слід починати з визначення α_d – частки добової нерівномірності, що підлягає

покриттю засобами короткострокового регулювання, вираженої у %. При цьому розуміємо, що в кожному з місяців року є доби з витратами газу, які перевищують максимальну добову його подачу системами газопостачання або з підземних сховищ $Q_{м.д.п.}$.

У цьому випадку α_d визначається за формулою

$$\alpha_d = \frac{\sum(K_{n_i}^d > A) - A \cdot \sum(n_i^d > A)}{Z_i \cdot 10^{-2}}, \quad (5)$$

де $\sum(K_{n_i}^d > 1)$ – сума часткових коефіцієнтів добової нерівномірності зі значеннями, що перевищують A за i -ий місяць;

$$A = \frac{Q_{м.д.п.}}{Q_{сер.д.х.м}}, \quad (6)$$

де $Q_{сер.д.х.м}$ – середньодобова витрата газу за самий холодний місяць; $\sum(n_i^d > A)$ – число часткових коефіцієнтів добової нерівномірності, що перевищують A за i -ий місяць; Z_i – число днів в i -му місяці.

При цьому ємність сховищ річного резерву газу для короткострокового регулювання добової нерівномірності газопостачання $V_{сх.д}$ може бути визначена за формулою [11, 12]:

$$V_{сх.д} = \sum_{i=1}^m Q_{M_i} \cdot \alpha_{d_i} \cdot 10^{-2}, \quad (6)$$

де m – число місяців, в яких є доби з витратою газу, що перевищують $Q_{м.д.п.}$; Q_{M_i} – місячна витрата газу за i -ий місяць.

За умови $Q_{м.д.п.} = Q_{сер.д.х.м}$ засоби довготривалого регулювання використовуються для покриття тільки сезонної нерівномірності, а при $Q_{м.д.п.} = Q_{м.д.}$ (максимально-добовій витраті газу) покриття добової сезонної нерівномірності здійснюється засобами довготривалого регулювання. Таким чином, ємність підземного сховища газу і запаси резервного палива у буферних споживачів, призначені тільки для покриття сезонної (і частково добової) нерівномірності газоспоживання, повинні бути визначені заздалегідь. Зазвичай, це різниця між загальною потребою в газі для покриття нерівномірності витрати за рік і кількістю газу, що подається зі сховищ короткострокового регулювання за рік для покриття добової нерівномірності [11, 12].

Частка об'єму годинної нерівномірності у загальному об'ємі максимально-добової витрати газу α_r може бути отримана по формулі [11, 12]:

$$\alpha_r = \frac{\sum(K_n^r > 1) - \sum(n^r > 1)}{24 \cdot 10^{-2}}, \quad (7)$$

де $\sum(K_n^r > 1)$ – сума часткових коефіцієнтів годинної нерівномірності газоспоживання, що перевищують 1; $\sum(n^r > 1)$ – число часткових коефіцієнтів годинної нерівномірності газоспоживання, що перевищують 1.

Покриття годин нерівномірності споживання в міських газорозподільних мережах, особливо в умовах невизначеності, може здійснюватися різними методами. При використанні для покриття сезонної добової нерівномірності газоспоживання тільки буферних споживачів газу погодинна нерівномірність

повинна покриватися за рахунок спеціальних заходів короткострокового регулювання. У цьому випадку бажана акумулююча ємність систем газопостачання розраховуватиметься за формулою [11, 12]:

$$V_{сх.д} = Q_{м.д.} \cdot \alpha_r \cdot 10^{-2}, \quad (8)$$

де $V_{сх.д}$ – ємність сховища регулювання годинної нерівномірності газоспоживання; $Q_{м.д.}$ – максимальна витрата газу добу за добу.

У загальному випадку, використовуючи акумулюючу здатності кінцевих ділянок систем газопостачання доцільно регулювати годинні витрати газу. Наприклад, в години нічного провалу графіка газоспоживання в кінцеві ділянки можна нагнати газу більше, ніж необхідно для покриття денних піків підключених споживачів, а в денні часи відповідно знижувати подачу газу нижче середньодобового рівня. Також при використанні для покриття сезонної добової нерівномірності газоспоживання сезонних надлишків газу, що акумулюються в підземних сховищах, покриття годинної нерівномірності можна здійснювати частково, а наявний запас газу для покриття нерівномірності газоспоживання в i -ий день може видаватися в мережу пропорційно розподілу добової витрати. У більшості випадків, особливо в умовах невизначеності, доцільно здійснювати максимально-добові відбори газу з підземних сховищ за оптимальним для них режимом, тобто рівномірно за годинами доби. Для цього слід використовувати акумулюючу ємність системи «сховище – пункти споживання». При цьому загальна ємність газосховищ з урахуванням резервів на покриття багаторічної нерівномірності газоспоживання, аварійного та інших запасів газу повинна складати до 17,5 % середньорічного об'єму газоспоживання.

До системи засобів покриття нерівномірності газоспоживання слід віднести також організацію підземних сховищ великих мас газу водоносних та виснажених пластах газових промислів. Слід зазначити, що підземні газосховища у водоносних пластах є високо економічними засобами покриття нерівномірності споживання газу. При цьому висока залежність економічної ефективності підземних газосховищ від характеру нерівномірності витрати газу обумовлена об'ємом сховища і максимально-добовою інтенсивністю відбору газу. Також на економічні показники сховища впливають глибина залягання пласта-колектору, дебіт свердловин, відстань від сховищ до пункту споживання газу, тощо.

Зазвичай капітальні вкладення в організацію газосховищ у виснажених газових промислах і витрати на їх експлуатацію нижче, ніж при створенні газосховищ у водоносних пластах, і схильні залежно від місцевих умов до значних коливань. Так, питомі капіталовкладення в сховища у виснажених промислах складають до 50 % від вкладень в сховища у водоносних пластах, а питомі експлуатаційні витрати – до 80 % [11, 12].

Дуже часто в містах, що розташовані за трасою магістральних газопроводів, між компресорними станціями для покриття годинної нерівномірності газоспоживання використовується зберігання газу в трубах під високим тиском. У цьому випадку в години

максимального газоспоживання увесь газ, що подається газопроводом і зберігається в трубах, буде поступати в міські газорозподільні мережі.

У години незначного газоспоживання частина газу з магістральних газопроводів буде поступати в міські газорозподільні мережі, а надлишки газу – в труби, що покладені в землю у вигляді батареї довжиною до 500 м. У години максимального газоспоживання увесь газ, що подається газопроводом і зберігається в трубах, буде поступати в газорозподільні мережі. Однак покриття годинної нерівномірності газоспоживання за рахунок резервів газу, що зберігається в трубах під тиском, економічно є більш ефективним, ніж використання акумулюючої здатності кінцевих ділянок систем газопостачання [11, 12].

Таким чином, основним напрямком боротьби зі шкідливим впливом нерівномірності газоспоживання є правильний вибір і поєднання методів її покриття та вирівнювання. Значні резерви ущільнення графіку газоспоживання полягають в оптимізації виробничого ритму промислових підприємств. Ущільнення графіку газоспоживання пов'язано також з необхідністю проведення комплексу заходів з боку, в першу чергу, міських газових господарств. Тут задіяно як певні організаційні заходи, так і значні капітальні вкладення та поточні експлуатаційні витрати.

Слід підкреслити, що існує безліч можливих варіантів організації системи регулювання нерівномірності газоспоживання, як за переліком використовуваних засобів, так і за їх питомою вагою. А економічна ефективність цих варіантів знаходиться в тісній залежності від різноманітних місцевих та ситуаційних умов.

Висновки

1. Проведений аналіз показав, що основним джерелом нерівномірності споживання природного газу в газотранспортній системі України є сезонні, добові та годинні коливання попиту, які посилюються дією факторів невизначеності, зокрема, воєнними ризиками, зміною структури споживачів та нестабільністю енергоринку.

2. Встановлено, що найбільш ефективними засобами покриття нерівномірності споживання газу є довготривалі методи регулювання (підземне зберігання у водоносних або виснажених пластах); короткотривалі методи регулювання (використання буферних споживачів-регуляторів, акумулюючих ємностей кінцевих ділянок систем газопостачання, зберігання газу в трубах під тиском). Рациональне поєднання цих підходів дозволяє підвищити ефективність використання газотранспортних потужностей і зменшити потребу в додаткових капітальних вкладеннях.

3. Запропоновано застосування комбінованих моделей математичної підтримки прийняття рішень, що поєднують методи стохастичного аналізу, сценарного прогнозування та цифрового моніторингу параметрів систем газопостачання. Це забезпечує підвищення точності оцінки нерівномірності споживання і зменшення ризиків при плануванні режимів подачі газу.

4. Наукова новизна роботи полягає у:

– формалізації та систематизації методів довготривалого та короткострокового регулювання нерівномірності газоспоживання з урахуванням різних видів невизначеності (воєнної, технологічної, економічної);

– обґрунтуванні використання стохастичного підходу для моделювання мінливих параметрів газоспоживання та їх впливу на сезонну, добову й годинну нерівномірність;

– введенні структурованої таблиці порівняння методів покриття нерівномірності, яка дозволяє проводити вибір оптимального комплексу заходів у конкретних експлуатаційних умовах;

– інтеграції елементів цифрового моніторингу та сценарного прогнозування у процес оцінювання стабільності систем газопостачання в умовах високої невизначеності.

5. Результати дослідження можуть бути застосовані під час розробки та реконструкції систем газопостачання регіонів і міст в умовах невизначеності, зокрема шляхом створення інтелектуальних систем управління газорозподільними мережами з використанням штучного інтелекту, машинного навчання та цифрових двійників. Запровадження таких рішень сприятиме формуванню адаптивних моделей управління, здатних забезпечувати стійку роботу газотранспортної системи України у мінливих і невизначених умовах, зокрема в умовах війни.

Список літератури:

- [1] Кубатко О.В., Калініченко Л.Л., Півень В.С. Напрями покращання енергетичної системи національної економіки // Економіка та підприємництво. 2024. № 2 (132).
- [2] Малиновська О.Я., Височанська М.Я. Енергетична безпека України як головний критерій ефективності функціонування національної економіки // Енергетика та економіка. 2023. Т. 1.
- [3] Сіренко Ю., Вольвач Т., Савойський О., Козін В. Аналіз стану енергетичної системи України та заходи щодо покращення ситуації // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025. № 1. С. 229–237.
- [4] Panek W., Włodek T. Natural Gas Consumption Forecasting Based on the Variability of External Meteorological Factors Using Machine Learning Algorithms, 2022.
- [5] Mesarić J., Dujak D. Analysis of Methods and Techniques for Prediction of Natural Gas Consumption: A Literature Review, 2019.
- [6] Коц Е. В. Natural gas network design under demand uncertainty, 2019.
- [7] O'Malley C., Hug G., Roald L. Stochastic Hybrid Approximation for Uncertainty Management in Gas Electric Systems, 2021.
- [8] Пономарчук І.А., Слободян Н.М. Газопостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / І.А. Пономарчук, Н.М. Слободян. Вінниця : ВНТУ, 2023. 103 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Ponomarchuk_2023_103.pdf
- [9] Приймак М.В. Моделі газонавантажень з врахуванням стохастичної періодичності та можливості їх статистичного аналізу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2003. № 2(7).
- [10] Дудля М.А., Ширін Л.М., Федоренко Е.А. Процеси підземного зберігання газу: підручник. Дніпро : Національний гірничий університет, 2012. 412 с.
- [11] Дубинський Н.М. Надежность систем газопостачання. 1970. 215 с.
- [12] Пешехонов Н.И. Проектирование газоснабжения. Киев, 1970. 147 с.

Надійшла до редколегії 30.10.2025