

ВПЛИВ ЯКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Вінницький національний технічний університет

***Анотація** У роботі проаналізовано вплив фізико-хімічних показників теплоносія (жорсткість, водневий показник рН, вміст розчиненого кисню) на ефективність та надійність автономних систем опалення індивідуальних житлових будинків. Узагальнено результати нормативних вимог і наукових досліджень, а також враховано дані експериментального визначення якості води з різних джерел. Показано, що відхилення параметрів теплоносія від нормативних значень призводить до утворення накипу, розвитку корозійних процесів, зростання гідравлічного опору та зниження коефіцієнта корисної дії теплогенераторів на 7 ... 12%. Обґрунтовано необхідність впровадження заходів водопідготовки для забезпечення енергоефективної та довговічної роботи систем опалення.*

Ключові слова: теплоносій, якість води, утворення накипу, корозія, системи опалення, енергоефективність, гідравлічний опір, житлові будівлі.

Abstract *This paper analyzes the influence of physicochemical properties of the heat carrier (hardness, pH value, dissolved oxygen content) on the efficiency and reliability of autonomous heating systems in individual residential buildings. The study summarizes regulatory requirements and scientific research results, as well as incorporates data from experimental water quality assessment from different sources. It is shown that deviations from standard parameters lead to scale formation, corrosion processes, increased hydraulic resistance, and a decrease in boiler efficiency by 7 ... 12%. The necessity of water treatment measures for ensuring energy-efficient and long-term operation of heating systems is substantiated.*

Keywords: heat carrier, water quality, scale formation, corrosion, heating systems, energy efficiency, hydraulic resistance, residential buildings.

Вступ

Вода як основний теплоносій у автономних системах опалення індивідуальних житлових будинків характеризується високою теплоємністю ($c = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$), доступністю та екологічністю. Однак природна вода без попередньої хімічної та термічної обробки містить розчинені гази (кисень, вуглекислий газ) та солі лужноземельних металів (кальцію та магнію), параметри якості якої досліджено за допомогою портативного приладу експрес-контролю [6].

Експлуатаційні характеристики таких систем (тепловіддача, гідравлічний опір, довговічність газових котлів, радіаторів та трубопроводів, енергоефективність) безпосередньо залежать від водно-хімічного режиму.

В умовах енергетичної кризи в Україні та зростання вартості газу енергоефективність автономних систем опалення індивідуальних житлових будинків є ключовим завданням. За даними Держстату України, понад 70% індивідуальних будинків використовують газові котли з водяним теплоносієм. Ступінь зношення таких систем частково зумовлена неналежною якістю води з централізованого водопроводу. Дослідження, проведені відповідно до нормативів, вказують, що порушення водно-хімічного режиму спричиняє перевитрати палива на 10–15% та скорочення терміну служби обладнання у 2–3 рази, роблячи контроль якості теплоносія критично актуальним для власників приватних будинків

Результати дослідження

Аналіз нормативних документів та наукових праць підтверджує ключову роль водно-хімічного режиму. «Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж» (Наказ Мінпаливенерго № 71 від 14.02.2007) встановлюють вимоги до рН (8.3–9.5) та вмісту кисню (<20 мг/дм³) для закритих систем, застосованих до автономних котелень індивідуальних будинків [1]. ДБН В.2.5-67:2013 регулює проектування опалення, наголошуючи на підготовці теплоносія для забезпечення ККД [2]. У роботі [3] наведено дані про зниження тепловіддачі у побутових системах на 8 ... 10% через вплив накипу нашаруванням в 1 мм. У дослідженні [4] кількісно оцінюється вплив жорсткості води на енергоефективність обладнання теплових мереж, включаючи автономні, з перевитратою палива до 12%. Аналіз факторів, що впливають на технічний стан сталевих трубопроводів, підкреслюючи роль корозії та накипу в закритих системах індивідуального опалення наведено в роботі [5]. Результати досліджень параметрів якості води, зокрема жорсткості, рН, О₂, з декількох різних джерел м. Вінниця, що використовується в тому числі як теплоносій у системах опалення індивідуальних житлових будинків наведено в роботі [6]. Ці джерела узгоджуються щодо необхідності деаерації та пом'якшення води для подовження терміну служби на 15 ... 20 років.

Якість теплоносія в автономних системах опалення індивідуальних житлових будинків регламентується «Правилами технічної експлуатації теплових установок і мереж» [1, 2]. Дотримання встановлених нормативних параметрів теплоносія є важливою умовою забезпечення надійної, енергоефективної та довготривалої експлуатації теплогенеруючого обладнання і елементів системи опалення. У таблиці 1 наведено основні нормативні вимоги до якості води для закритих систем опалення, що використовуються в автономних системах тепlopостачання житлових будинків.

Таблиця 1 - Нормативних вимоги якості води для закритих систем опалення

Параметр	Нормативне значення
рН	8.3–9.5 [1]
Вміст О ₂ , мг/дм ³	< 20 [1]
Загальна жорсткість, мг-екв/дм ³	< 0.1 (після пом'якшення) [1, 6]
Температура теплоносія, °С	70–95 (побутові котли) [2]

Аналіз впливу відхилень від нормативних показників якості теплоносія на роботу газових котлів потужністю 20 ... 50 кВт (характерних для індивідуальних житлових будинків площею 100 ... 300 м²) дозволив встановити низку закономірностей, пов'язаних із зміною теплотехнічних та експлуатаційних характеристик системи.

Процеси накипоутворення (солевідкладення)

Одним із основних негативних явищ є утворення накипу на поверхнях теплообмінників та трубопроводів. При нагріванні води до температур +80 ... +90 °С відбувається термічний розклад солей тимчасової жорсткості, зокрема гідрокарбонату кальцію:



У результаті реакції карбонат кальцію осаджується на внутрішніх поверхнях теплообмінників котлів (мідних або сталевих), трубопроводів (сталевих або полімерних) та радіаторів, формуючи шар накипу.

Формування навіть тонкого шару відкладень (0,5 ... 1 мм) призводить до істотного погіршення теплопередачі. Це пояснюється тим, що теплопровідність накипу становить $\lambda_{накипу} = 0,1 - 0,2 \text{ Вт/м} \times \text{К}$, що у сотні разів менше, ніж теплопровідність сталі $\lambda_{сталь} = 45 - 50 \text{ Вт/м} \times \text{К}$ [3].

Унаслідок цього зростає тепловий опір теплопередачі, що призводить до зменшення коефіцієнта теплопередачі та погіршення ефективності роботи теплообмінного обладнання.

Загальний коефіцієнт теплопередачі визначається залежністю:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (1)$$

де: α_1 — коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до внутрішньої поверхні стінки теплообмінника, Вт/(м²·К);

α_2 — коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки до середовища або другого теплоносія, Вт/(м²·К);

δ — товщина шару відкладень (накипу) або стінки, м;

λ — коефіцієнт теплопровідності шару накипу або матеріалу стінки, Вт/(м·К)

Збільшення товщини шару накипу призводить до зростання термічного опору теплопередачі та відповідного зменшення загального коефіцієнта теплопередачі, що викликає підвищення температури стінок теплообмінника, перевитрати палива та прискорене зношування обладнання. Крім того, наявність відкладень сприяє локальному перегріву металу теплообмінника, що може викликати виникнення термічних напружень, деформації елементів теплообмінної поверхні та зниження ресурсу котельного обладнання.

Практичні дослідження показують, що утворення шару накипу товщиною лише 1 мм знижує коефіцієнт теплопередачі приблизно на 8 ... 10 %, що потребує збільшення різниці температури теплоносія (ΔT) на 5 ... 10 °С для забезпечення тієї ж теплової потужності. Як наслідок спостерігається зростання витрати природного газу на 7 ... 12 %, що призводить до зниження ефективності роботи котла. У такому випадку коефіцієнт корисної дії газового котла може знижуватися приблизно з 92 % до 82 % [3, 5].

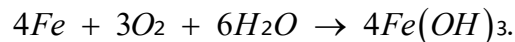
У системах опалення без застосування хімічної водопідготовки (ХВО) процес накипоутворення може інтенсивно розвиватися вже протягом 1–2 опалювальних сезонів, особливо за умови використання води з підвищеною жорсткістю (понад 3 мг-екв/дм³), що є характерним для багатьох регіонів України [6].

Емпіричні дослідження [7] показують, що швидкість накопичення накипу суттєво залежить від жорсткості води. Навіть при відносно низькій жорсткості (~0,1°dH) на поверхнях теплообмінників може утворюватися близько 0,1 мм відкладень за рік, тоді як при жорсткості близько 1°dH товщина накипу може досягати приблизно 1 мм/рік. У системах опалення без належної водопідготовки це призводить до накопичення шару відкладень у декілька міліметрів протягом кількох років експлуатації, що істотно погіршує теплопередачу та підвищує витрати палива.

Корозійні процеси.

Іншим важливим фактором, що впливає на надійність систем опалення, є електрохімічна корозія металевих елементів системи [5, 6]. Наявність розчиненого кисню у теплоносії ($O_2 > 20$ мкг/дм³) та відхилення водневого показника рН у кисло сторону (рН < 8,3) сприяють інтенсифікації корозійних процесів у сталевих трубопроводах та теплообмінниках котлів.

Основна реакція корозійного окиснення заліза має вигляд:



Швидкість корозії сталевих елементів систем опалення суттєво залежить від хімічного складу води, зокрема її кислотності, вмісту розчиненого кисню та мінералізації. При зниженні значення рН до нейтральної або слабокислої області (приблизно рН 6,5–7,0) корозійна активність водного середовища зростає, оскільки зменшується стабільність захисних оксидних плівок на поверхні сталі. За даними експериментальних досліджень, у звичайній воді швидкість рівномірної корозії вуглецевої сталі зазвичай становить приблизно 0,02–0,07 мм/рік, залежно від складу води та умов циркуляції. За несприятливих умов експлуатації (підвищений вміст кисню, відсутність захисних відкладень або інтенсивний масообмін) швидкість корозії може зростати до значень порядку 0,1–0,3 мм/рік. Підтримання слаболужного середовища теплоносія (рН близько 8,3–9,5), передбаченого нормативними вимогами, сприяє формуванню стабільних захисних плівок оксидів заліза та суттєво знижує швидкість корозійного руйнування металу.

Продукти корозії — оксиди та гідроксиди заліза, що утворюють шламові відкладення, транспортуються потоком теплоносія та осідають у радіаторах і вузьких каналах опалювальних приладів. У біметалічних та алюмінієвих радіаторах, де діаметр каналів становить лише 5–10 мм, такі відкладення можуть зменшувати прохідний переріз на 20 ... 30 %, що погіршує циркуляцію теплоносія. Додатково слід враховувати, що вміст розчиненого кисню у звичайній водопровідній воді становить 5 ... 10 мг/дм³, що у 250 ... 500 разів перевищує нормативні значення для теплоносія систем опалення [1, 6]. Це пояснює інтенсивний розвиток корозійних процесів у системах, де відсутня належна дегазація або хімічна підготовка води.

Вплив відкладень на гідравлічні характеристики системи

Накопичення накипу/шламу підвищує абсолютну шорсткість труб ε з 0.1 мм (нова) до 0.5 мм, зменшуючи число Рейнольдса Re та збільшуючи опір ζ (за формулою Дарсі-Вейсбаха). Для типового контуру ($L=50$ м, $D=20$ мм) опір зростає на 30 ... 50%, циркуляційні насоси (0.5 ... 1 кВт) перевитрачають електроенергію на 25 ... 30% або не забезпечують витрату $G=0.5$... 1 м³/год, спричиняючи "холодні радіатори" (розбаланс $\Delta T > 10^\circ\text{C}$ у кінці) [4, 5]. На рис. 1 представлено схему залежності опору від шорсткості.

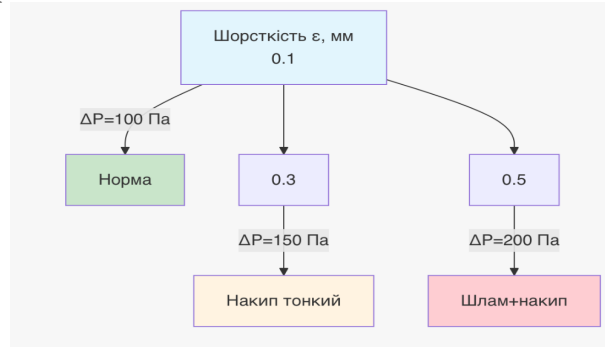


Рисунок 1 – Схема впливу шорсткості труб на гідравлічний опір системи опалення

Висновки

Експлуатаційна надійність та енергоефективність систем опалення індивідуальних житлових будинків прямо залежать від якості теплоносія. Непідготовлена водопровідна вода спричиняє накип, корозію та зниження ККД котлів. Рекомендується впровадження ХВО: іонообмінні пом'якшувачі, деаератори, інгібітори корозії, що зберігає ККД та подовжує експлуатацію на 15 ... 20 років. Контроль водно-хімічного режиму дозволяє знизити енергоспоживання систем опалення на 7 ... 12 % та підвищити надійність обладнання. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та експлуатації автономних систем опалення для обґрунтування необхідності водопідготовки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж: затверджено наказом Міністерства палива та енергетики України від 14.02.2007 № 71. Вид. офіц. Київ, 2007.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2013-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 128 с.
3. Богуславський Л. Д. та ін. Енергозбереження в системах тепlopостачання, вентиляції та кондиціонування повітря. Київ, 2018. 256 с.
4. Іванов В. В. Водно-хімічні режими теплових мереж та вплив якості води на енергоефективність обладнання. Вісник теплоенергетики. 2021. № 4. С. 45–51.
5. Панкевич В. В., Гуменчук А. Є. Аналіз факторів, що впливають на технічний стан сталевих трубопроводів. Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)». Вінниця: ВНТУ, 2025. [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/22791/18904> (дата звернення: 22.03.2026).
6. Горюн О. О., Гуменчук А. Є., Колачинський Ю. М. Дослідження параметрів якості міської води з використанням портативного приладу експрес-контролю. Матеріали міжнародної конференції "Енергоефективність в галузях економіки України-2025" : збірник матеріалів. Вінниця: ВНТУ, 2025. [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2025/paper/viewFile/26480/21815> (дата звернення: 22.03.2026).
7. Energy cost reduction through online water quality monitoring. [Електрон. ресурс]. Режим доступу: https://heylanalysis.de/en/applications/boiler-houses/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 15.03.2026).

Горюн Олег Олегович – PhD, старший викладач кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет ORCID: 0000-0001-5678-835X, e-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua

Гуменчук Анастасія Євгенівна – студентка групи СМ-236 факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, e-mail:

flora.butterfly68954@gmail.com

Oleh Horiun — PhD, senior lecturer of the department of engineering systems in construction, faculty of construction, civil and environmental engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, ORCID: 0000-0001-5678-835X, e-mail : oleggoriun@vntu.edu.ua.

Anastasiya Humenchuk – student of the Sm-23b group of the Faculty of Civil Engineering, Civil and Environmental Engineering e-mail: flora.butterfly68954@gmail.com