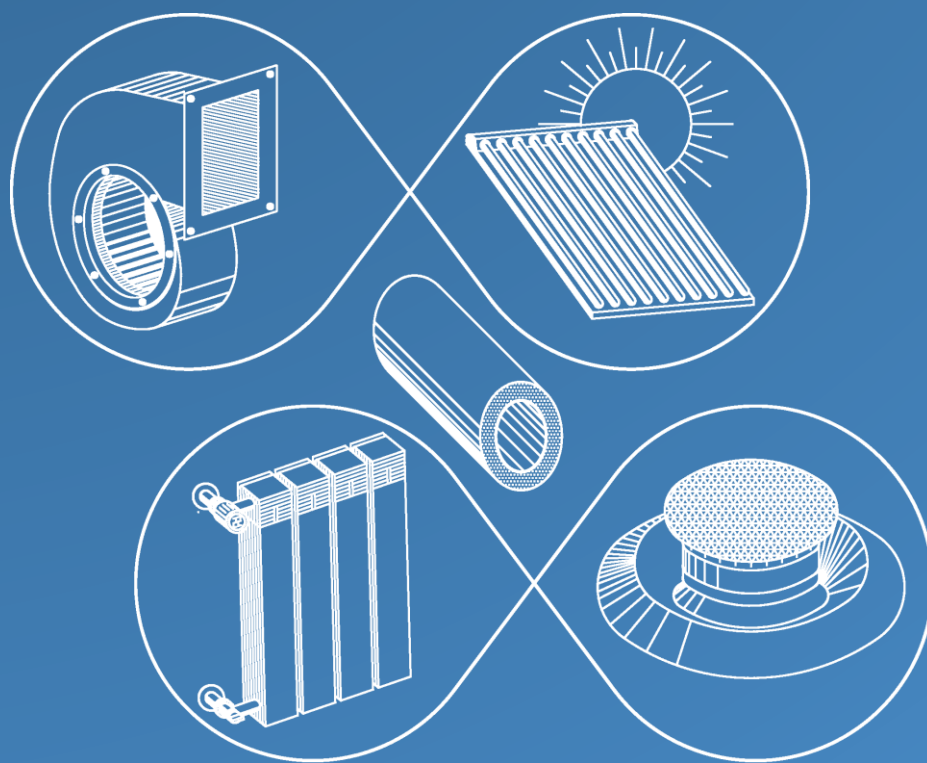


ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2023

Випуск 44



КИЇВ 2023

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Kiev National University of Construction and Architecture

**VENTYLIATSIIA, OSVITLENNIA
TA TEPLOHAZOPOSTACHANNIA**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL COLLECTION

founded in 2001

ISSUE 44

Kyiv 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 44

Київ 2023

УДК 697
В29

ISSN 2409-2606

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 44 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2023. – 49 с.

У збірнику висвітлюються результати наукових досліджень, питання теорії і практики з опалення, вентиляції і кондиціонування повітря, теплопостачання та газопостачання. Призначений для наукових працівників, викладачів, виробників, докторантів, аспірантів та студентів.

Редакційна колегія: докт. техн. наук, професор В. О. Мілейковський (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); ас. О.А. Дудніков (відповідальний секретар); докт. екон. наук, доцент К. М. Предун; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професорка Т. М. Ткаченко; докт. техн. наук, професор Г. В. Жук; докт. техн. наук, професор В. А. Кравець; докт. техн. наук, професор Г. Гавардашвілі (Грузія); докт. техн. наук, професор З. Гвішіані (Грузія); докт. техн. наук, професор Н. Мамедов (Азербайджан); докт. техн. наук, професор Б. Рашуо (Сербія); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); докт. техн. наук, професор М. Улевіч (Польща); доктор інженер, доцент А. Ліс (Польща); доктор інженер, доцент А. Уйма (Польща); докт. техн. наук, професор О. Токмаджян (Вірменія); докт. техн. наук, професор А. Маргарян (Вірменія); докт. техн. наук, доцент В. Токмаджян (Вірменія); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 3 лютого 2023 р., протокол № 5.

Адреса редакційної колегії: Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теплогазопостачання і вентиляції та кафедра теплотехніки, Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, 03037, Україна.

тел. +380(44)245-48-33

© Київський національний університет будівництва і архітектури

З М І С Т

В. Р. Вахула

Проектування системи витісняючої вентиляції в музейних приміщеннях 5

О. В. Березюк, М. С. Лемешев

*Удосконалення математичної моделі ефективності видобування звалищ-
ного газу..... 12*

Л. І. Макаренко, О. В. Приймак

*Забезпечення рекомендованої ВООЗ якості повітря в офісних приміщеннях
з існуючою системою вентиляції 17*

Ю. Й. Франчук, В. А. Коновалюк

*Особливості експлуатації інженерних систем будівель під час воєнного
стану..... 23*

А. Ф. Гасімов, Н. Я. Мамедов, С. М. Акбарова, Г. Г. Фейзієва

Проблеми енергоефективності в будівлях: аналіз світового досвіду 30

П. М. Гламаздин, Н. В. Чепурна, Б. І. Козячина

*Вибір методики розрахунку теплового навантаження систем гарячого во-
допостачання об'єктів зі значною нерівномірністю споживання..... 39*

C O N T E N T S

V. Vakhula

Design of displacement ventilation system in museum premises..... 5

O. Bereziuk, M. Lemeshev

Improvement of the mathematical model of the extraction efficiency of landfill gas..... 12

L. Makarenko, O. Priymak

Ensuring normal air quality in office premises with the existing ventilation system..... 17

Yu. Franchuk, V. Konovaliuk

Features of exploitation of engineering systems of buildings during martial law 23

A. Gasimov, N. Mammadov, S. Akbarova, G. Feyziyeva

Energy Efficiency Issues in Buildings: Analysis of World Practice 30

P. Glamazdin, N. Chepurna, B. Koziachyna

The selection of a methodology for calculating the heat load of hot water supply systems for facilities with significant uneven consumption 39

УДК 697.95

Проектування системи витісняючої вентиляції в музейних приміщеннях

В. Р. Вахула¹

¹асистент, Київський національний університет будівництва і архітектури, v.vahula@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-6421

Анотація. В музейних приміщеннях, що розташовані в будівлях пам'яток архітектури важливим питанням є забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища та способ організації повітрообміну у виставкових та експозиційних залах. В таких будівлях неможливо проводити повітропроводи, тому використовуються існуючі канали від камінів, та природних витяжних каналів. В статті був розглянутий Національний центр народної культури "Музей Івана Гончара". Після аналізу архітектурних креслень музею було вибрано витісняючу систему вентиляції для організації повітрообміну. У витісняючій вентиляції під дією підйомної сили проводиться розширення повітря по висоті приміщення, завдяки чому якість повітря в зоні обслуговування вище, ніж в системах перемішувальної вентиляції. Об забезпечити необхідний мікроклімат запропоновано два варіанти організації повітрообміну. У рамках виконання поставленого завдання було проведено серію натурних досліджень параметрів повітряного середовища у приміщенні музею з такими параметрами: середня температура повітря в приміщенні знаходилася в межах $t_{wz} = 20$ °С, відносна вологість становила $\phi_{wz} = 55-60$ % в експозиційних залах. Розробка проекту системи формування мікроклімату музеїв, які розміщені в будівлях пам'яток історії та культури, потребує індивідуального підходу та виконання комплексу натурних, експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування температурно-вологісного режимів у основних приміщеннях музею. Для дослідження повітрообміну та перетікання повітря між залами створено тривимірну модель, та змодельований рух повітря у двох варіантах для приміщень №40, 47 та 48 з урахуванням виконаних натурних досліджень та математичного моделювання варіантів організації повітрообміну було запропонований проект модернізації систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Ключові слова: натурні дослідження, збереження пам'яток, музей, мікроклімат, витісняюча вентиляція.

Технологічні норми і вимоги. Ідеальними умовами для збереження експонатів є підтримка єдиного температурно-вологісного режиму в залах і сховищах музею.

Згідно з технологічними нормами:

- можливе коливання температури від 16 °С взимку до 24 °С влітку (найбільш краща температура: 18-22 °С);
- відносну вологість повітря необхідно підтримувати в межах 55 % \pm 5 % .

Фахівці галузі рекомендують встановити в приміщеннях зберігання картин систему автоматичного цілодобового і цілорічного контролювання параметрів повітря, яка значно полегшити регуляцію температурно-вологісного режиму.

Для зберігання картин підходять прецизійні кондиціонери, що відрізняються високою точністю контролю і управління температурою і вологістю, надійністю в експлуатації і повною сумісністю з системами управління мікрокліматом [1 - 8]

Розділимо приміщення музею на такі категорії:

- допоміжні приміщення, де відсутні колекції - в таких приміщеннях систему вентиляції та кондиціонування повітря передбачають, як для звичайних цивільних;

- виставкові та експозиційні зали, де містяться колекції, і є необмежений доступ відвідувачів - необхідне обслуговування окремою системою вентиляції;

- фондосховища, де містяться колекції, і присутній обмежений доступ відвідувачів - необхідне також обслуговування таких приміщень окремою системою вентиляції, не пов'язаної з іншими системами.

Параметри мікроклімату в різних приміщеннях музею. Дані параметри визначаються в залежності від властивостей матеріалу, з якого виготовлена колекція:

- гігроскопічні властивості (тканина, дерево, шкіра, мінерали, папір);
- фізико-хімічні (метал, скло, кіноматеріали, фотографічні);
- хімічним складом матеріалів (органічне це з'єднання або неорганічне, який тип фарби присутній на картині).

Потрібно також враховувати, що можуть виникати конфліктні умови збереження для різних типів матеріалів колекції. Деякі матеріали не допускається зберігати разом. Наприклад, не можна зберігати паперові твори і фотоматеріали разом, так як папір виділяє газ, які надають руйнівний вплив на фотоматеріали.

В архівах, лабораторіях холодного збері-

гання повинна підтримуватися температура повітря 10-14 °С, відносна вологість повітря 30-50 %. У приміщеннях зберігання експонатів з металу, для виключення корозії, відносна вологість повітря не повинна перевищувати 30 %.

Швидкість повітря (рухливість) в музейних приміщеннях повинна знаходитися в межах 0,1-0,3 м/с, швидкість обдування відкрито розташованих експонатів (картин і інших чутливих до ерозії поверхонь) потоком припливних струменів не повинна перевищувати 0,2 м/с.

Витрати повітря, особливості повітрообміну. Витрата припливного повітря в приміщеннях музею при наявності колекцій слід визначати розрахунком відповідно до прийнятої схеми організації повітрообміну і типом розподільника повітря. Слід враховувати теплопоступлення і вологонадходження від людей (відвідувачів та музейних працівників), теплопоступлення від сонячної радіації, в тому числі розсіяної сонячної радіації через ліхтарі природного освітлення, теплопоступлення від штучного освітлення, в тому числі і підсвічування.

В експозиційних залах слід приймати площу підлоги, що припадає на одну людину: максимальне значення - 7,4 м², середнє значення - 5,6 м², мінімальне значення - 3,7 м². Загальний витрата припливного повітря в приміщенні експозиції повинен бути достатній, щоб забезпечити відсутність застійних зон навколо експонатів, в той же час не допускається направляти приточну струмінь на них. Кратність повітрообміну повинна бути не менше 6-8.

У приміщеннях сховищ слід приймати повітрообмін не менше двох-триразового з метою забезпечення гарної циркуляції і перемішування повітря.

У лабораторіях реставрації схема організації повітрообміну повинна вибиратися з урахуванням щільності речовин, які використовуються при реставрації. Вимогам до інтер'єрів музейних приміщень найбільш відповідають щільні повітророзподільники.

Для наочності розглянемо експозиційні приміщення у порівнянні з приміщеннями фондів (іншою великою частиною музейного комплексу), що відрізняються від них призначенням і функціями. Саме ці відмінності і визначають особливості формування мікроклімату в експозиції та фондосховищі.

Найбільший вплив на умови зберігання в експозиційних приміщеннях надають їх архітектурні особливості або особливості проектування. Ці особливості визначаються необхідністю забезпечення доступу і перебування відві-

дувачів у залах. Призначення фондів не передбачає присутності великих переміщаються мас людей. Тому мікроклімат в них у продовж доби можна вважати менш мінливим.

Фондові приміщення можуть бути навіть більше за кубатурою, але вони зазвичай заповнені численними стелажми, шафами, спеціальним обладнанням. Все це перешкоджає необхідній циркуляції повітря, сприяє утворенню застійних зон, чого, як правило, не спостерігається в експозиційних залах, де наявність безлічі відкритих під час відвідування дверей і віконних прорізів призводить до того, що швидкість повітряного потоку може перевищувати прийняту норму 0,1 м/с. Нівелює невеликі коливання температури і вологості вільний струм повітря між залами.

Принципи витісняючої вентиляції. Повітряні потоки в вентилязованому приміщенні можна розділити на два типи: потоки при перемішувальній вентиляції і потоки при витісняючій вентиляції. При використанні перемішувальної вентиляції повітря подається таким чином, що повністю змішується з повітрям в приміщенні і концентрація забруднюючих речовин однакова по всьому об'єму. У витісняючій вентиляції під дією підйомної сили проводиться розшарування повітря по висоті приміщення, завдяки чому якість повітря в зоні обслуговування вище, ніж в системах перемішувальної вентиляції.

Протягом багатьох років витісняюча вентиляція використовувалася в виробничих будівлях з великими тепловими навантаженнями. Починаючи з середини 80-х років, її стали широко застосовувати і в невиробничих будівлях, особливо в Скандинавських країнах. В останні роки інтерес до витісняючої вентиляції підвищився в усьому світі, тому що вона дає можливість підвищити як температурну ефективність, так і ефективність вентиляції. В основі даного типу вентиляції лежить різниця щільності повітря, завдяки чому повітря в приміщенні розділяється на дві зони: верхню забруднену і нижню чисту зони (рис. 1.). Це забезпечується припливом з низькою швидкістю холодного повітря в нижню зону і видаленням повітря з верхньої зони. Вільна конвекція від джерел тепла забезпечує вертикальне переміщення повітря в приміщенні. Якщо джерела конвективного тепла в приміщенні одночасно є джерелами забруднення, конвективні потоки переміщують тепле забруднене повітря у верхню зону. Співвідношення витрати повітря в конвективних потоках і витрати припливного повітря визначає висоту межі двох зон. Сума витрат повітря в висхідних

(нагрітих) конвективних потоках на обраному рівні мінус сума витрат повітря в низхідних (холодних) конвективних потоках на тому ж рівні дорівнює витраті припливного повітря в приміщенні. Таким чином, збільшення витрати припливного повітря при незмінній витраті в конвективних потоках викликає зміщення кордону між зонами вгору, а зниження – вниз [4].

Безліч явищ в вентиляованих приміщеннях, таких як вертикальний температурний градієнт, рівні швидкості в розшарованому потоці, рівні розшарування і ефективність вентиляції можуть бути описані числом Архімеда. Це число виражає відношення між підйомною силою і силою інерції. Зазвичай воно визначається як:

$$A_r = \Delta \rho g L / (\rho \theta^2), \quad (1)$$

де $\Delta \rho$ - різниця щільності холодного і теплого повітря, кг/м^3 ; g - прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; L - характерний розмір, м ; ρ - щільність повітря, кг/м^3 ; V - швидкість повітря, м/с .

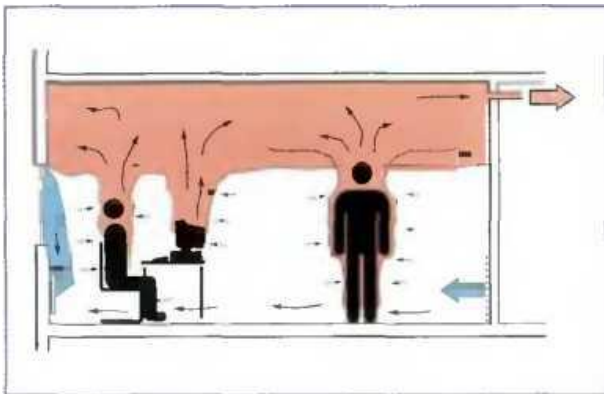


Рис. 1. Схема повітряних потоків в приміщенні з витісняючою вентиляцією.

Число Архімеда може бути виражено багатьма способами: визначенням різниці щільності через різницю температур і ін. Але основне положення залишається незмінним; більше значення числа Архімеда означає домінування підйомних сил; менше значення - домінування сил інерції (обумовлених швидкістю повітря).

При наявності в приміщенні температурної стратифікації наприклад в приміщенні з витісняючою вентиляцією, стратифікація впливає на характеристики конвективних потоків, рушійною силою яких є різниця щільності (температур) потоку і навколишнього повітря. При зменшенні цієї різниці потоки розпадаються і поширюються по приміщенню в горизонтальній площині (рис. 2).

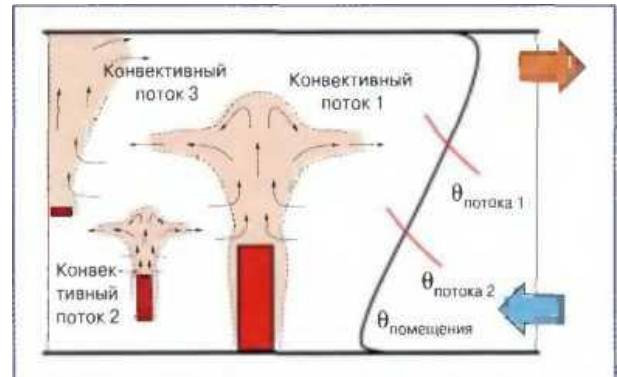


Рис. 2. Схема поширення повітряних потоків в приміщенні з витісняючою вентиляцією.

Натурні дослідження. У рамках виконання поставленого завдання було проведено серію натурних досліджень параметрів повітряного середовища у приміщенні музею

Для проведення вимірів будівлю музею була умовно розділена на характерні зони, обумовлені об'ємно-планувальними особливостями інтер'єру

У кожній зоні було виділено точки замірів (рис. 3). Параметри визначалися на трьох рівнях за висотою (1,5 м, 2,0 м та 2,5 м). На момент дослідження повітря в приміщенні температура відносна вологість та барометричний тиск зовнішнього повітря складав $t_{ext}=12,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\phi_{ext}=61\%$ $B=760 \text{ мм}$

У процесі натурних досліджень вимірялися

- температура повітря, $^\circ\text{C}$;
- відносна вологість, %;
- швидкість руху, м/с ;

Середня температура повітря в приміщенні знаходилася в межах $t_{wz}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, а відносна вологість становила $\phi_{wz}=55-60\%$ в експозиційних залах.

Розробка проекту системи формування мікроклімату музеїв, які розміщені в будівлях пам'яток історії та культури, потребує індивідуального підходу та виконання комплексу натурних, експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування температурно-вологісного режимів у основних приміщеннях музею. Параметри повітряного стану в холодний період року підтримуються системою опалення за рахунок конвекторів, встановлених у підлозі. Повітрообмін здійснюється за рахунок неорганізованої повітропроникності інфільтрації та періодичного провітрювання. Такий спосіб призводить до утворення застійних зон з низькою циркуляцією повітря і погіршення стану мікроклімату в музейному приміщенні

При розробці реконструкції систем вентиляції та кондиціонування доцільно використовувати існуючі канали в стінах першого поверху,

розмістити припливно-витяжну установку з рекуперацією теплоти зовні приміщення у внутрішньому дворі музею, що передбачає очищення, зволоження, бактеріологічну обробку в залах (50, 51, 52, 53).

Для дослідження повітрообміну та перетікання повітря між залами створено тривимірну модель Приміщень №40, 47 та 48 (рис. 4) Тривимірна модель створена з наданих планів співробітниками музею та контрольного особистого вимірювання геометричних розмірів усіх огорожених контрукцій та деталей інтер'єра.

Моделювання руху повітря в приміщеннях

музею проводилось у двох варіантах розподілу повітря в залежності від прийнятих конструктивних рішень подачі та видалення повітря в/з приміщення:

Варіант 1: подача та видалення повітря за допомогою існуючих решіток в стіні та додаткових повітропроводів у приміщенні з мінімальним втручанням до архітектурно-планувальних рішень будівлі (рис. 5).

Варіант 2: подача та видалення повітря за допомогою тільки існуючих каналів та створенням надлишкового тиску для перетікання повітря з одного приміщення в інше (рис. 6).

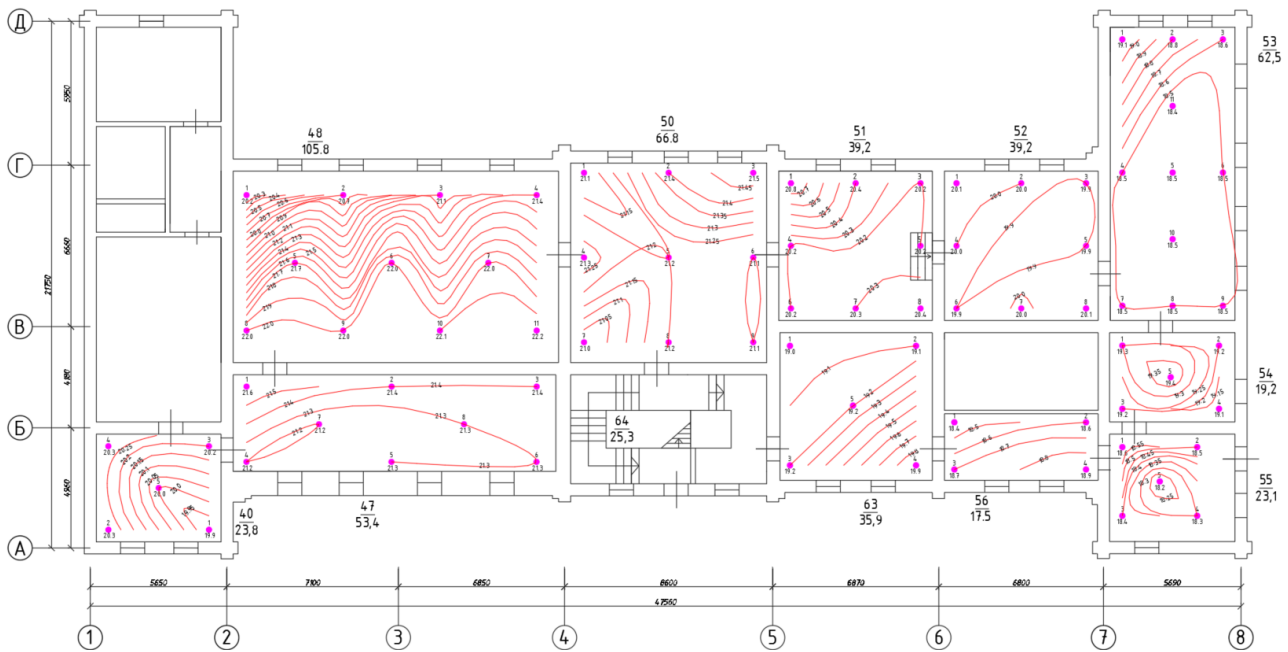


Рис. 3 Ізотерми в плані музею на відмітці 2 м від підлоги

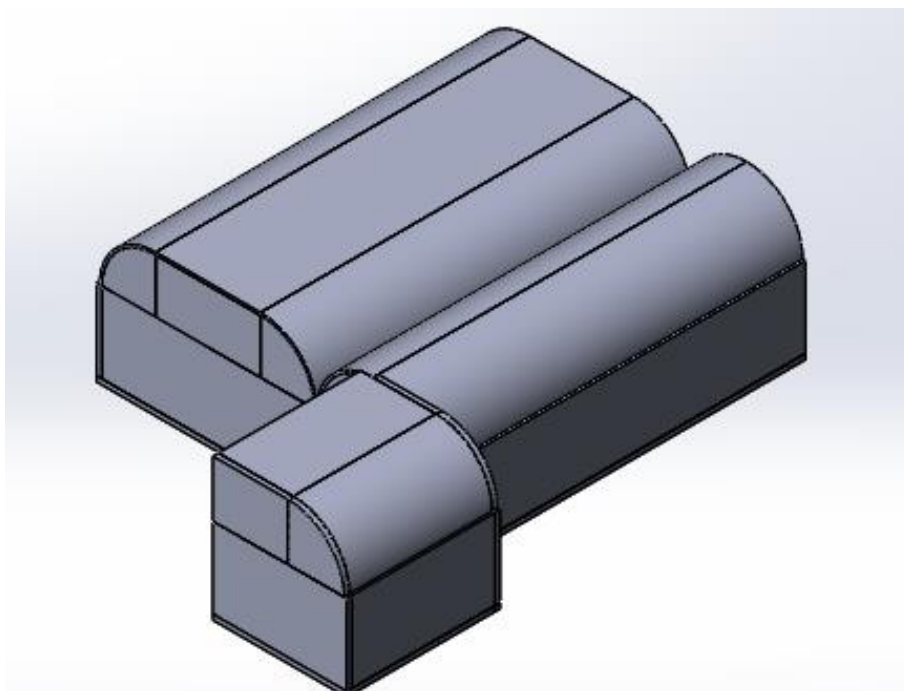


Рис. 4 Модель для дослідження повітрообміну та перетікання повітря між залами №40,47 та 48.

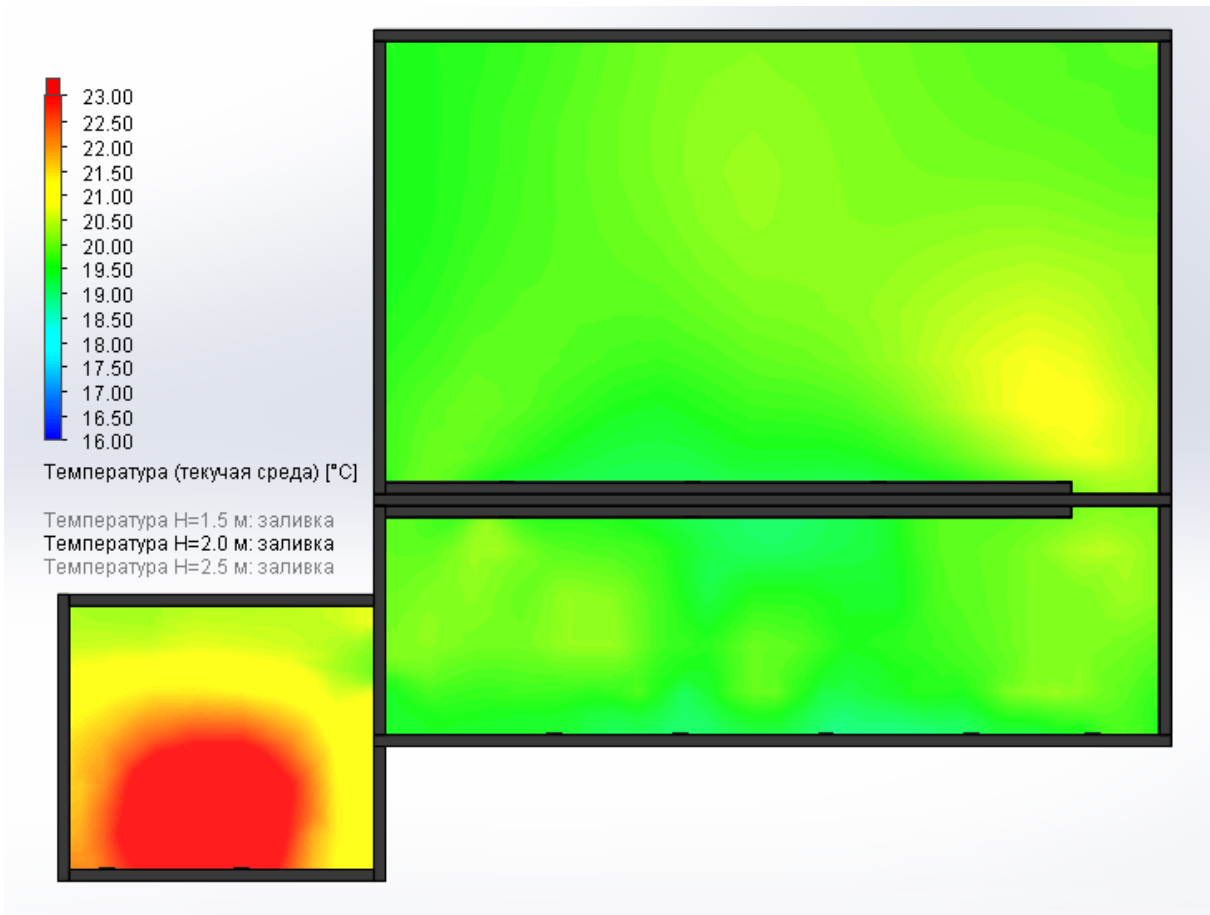


Рис. 5 Розподіл температури повітря в приміщеннях №40, 47 та 48 за варіантом 1 на висоті 2,0 м від підлоги.

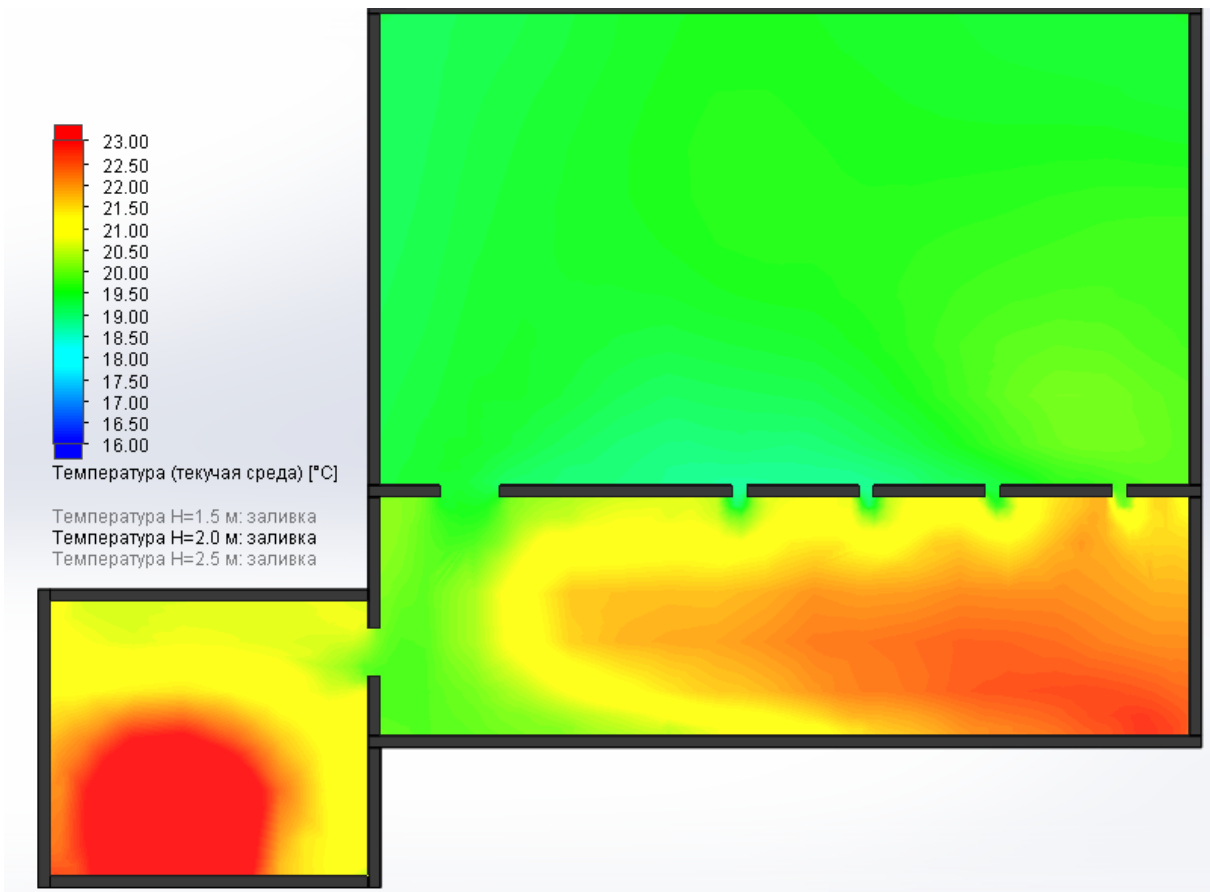


Рис. 6 Розподіл температури повітря в приміщеннях №40, 47 та 48 за варіантом 2 на висоті 2,0 м від підлоги.

Висновки. На основі отриманих даних математичного моделювання розподілу повітря в приміщенні за двома варіантами та на основі натурних досліджень можемо зробити наступні висновки:

1. Варіант 1 – кращий варіант розподілу повітряних потоків у приміщенні, ніж Варіант 2, адже за допомогою моделювання можна наочно побачити різницю в якості повітря: температури та відносної вологості. При виборі даного варіанту ми отримуємо рівномірний розподіл температури та відносної вологості в приміщенні, що відповідає нормам та стандартам для збереження музейних експонатів протягом більшого часу та тимчасовому знаходженню людей (відвідувачів музею) у великій кількості: проведення екскурсій у музеї та проведення презентацій нових колекцій та семінарів у приміщенні №48.

2. Моделювання за Варіантом 2 показує нам більш хаотичні рухи повітря при нестационарному знаходженні людей в приміщенні та

менш рівномірний розподіл температури та відносної вологості. Однак, даний варіант вимагає найменших утручань у архітектурно-планувальні рішення існуючих приміщень та будівлі в цілому. А збереження інтер'єру та екстер'єру приміщення – першочергова ціль при реконструкції, вдосконаленні та покращенні внутрішніх кліматичних умов для знаходження людей для даного типу приміщень. Для реалізації покращення умов мікроклімату в приміщеннях за Варіантом 2 буде достатньо створити декілька отворів для перетікання повітря з одного приміщення в інше та перенести висоту витяжних решіток для більш рівномірного розподілу повітря.

3. Варіант, обраний для реалізації даного проекту реконструкції є Варіант 2, що відповідає усім нормам та стандартам мікроклімату для збереження колекцій та при цьому вимагає найменшого втручання до інтер'єру приміщення та перепланувань розміщення музейних експонатів

References

1. Dovhaliuk V., Chovniuk Y, Shyshyna M, Moskvitina A. “Funktionalnyi analiz teploprovodnosti ta viazkosti kvazitverdikh kapilarno-porystykh til za zminnykh parametriv povitrianoho seredovyscha pry muzeinomu zberihanni” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 34, 2020, pp. 7-15, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.34.7-15>
2. Dovhaliuk V., Chovniuk Y, Skliarenko O., Sytnytska A. “Enerhoefektyvni tekhnolohii orhanizatsii povitrozpodilu v muzeiakh riznoho pryznachennia pry zminnykh rezhymakh teplovolonadkhdzhen” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 32, 2020, pp. 6-16, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.0.6-16>
3. Chovniuk Y, Dovhaliuk V., Kravchuk V. “Metod analizu izoterm, poverkhnevoi fraktalnoi rozmirnosti ta dynamichnoho khaosu pry volohoobmini koloidnykh kapilarno-porystykh muzeinykh eksponativ za zminnykh umov mikroklimatu” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 30, 2019, pp. 6-19, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.30.6-19>
4. Dovhaliuk V., Chovniuk Y, Ivanov Y, Sytnytska A. “Mozhlyvosti zastosuvannia fraktalnykh modelei dlia identyfikatsii mikroklimatychnykh parametriv muzeinykh prymishchen” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 29, 2019, pp. 6-11, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.29.6-11>
5. Dovhaliuk V., Chovniuk Yu, Shyshyna M. “Funktionalnyi analiz teploprovodnosti ta viazkosti kvazitverdikh kapilarno-porystykh til za zminnykh parametriv povitrianoho seredovyscha pry muzeinomu zberihanni” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 28, 2019, pp. 6-16, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.28.6-16>
6. Chovniuk Y, Dykteruk M., Dovhaliuk V., Skliarenko O. “Kontseptualni osnovy stvorennia mekhatronnykh system keruvannia mikroklimatom muzeinykh prymishchen z vykorystanniam nechitkykh lohichnykh kontroleriv (rehulatoriv)” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 27, 2018, pp. 6-17, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.27.6-17>
7. Chovniuk Y, Dykteruk M., Dovhaliuk V., Skliarenko O. “Vykorystannia elektromahnitnykh khvyli dlia kontroliu protsesiv volohoperenosu v materialakh khudozhnykh vyrobiv” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 26, 2018, pp. 6-12, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26.6-12>
8. Dovhaliuk V., Chovniuk Yu. “Kontseptualni osnovy analizu teplomasoobminnykh i deformatsiinykh protsesiv u polimernykh dyspersnykh tilakh dlia formuvannia mikroklimatu muzeiv” *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 23, 2017, pp. 6-24, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2017.23.6-24>

UDC 697.95

Design of displacement ventilation system in museum premises

V. Vakhula¹

¹Assistant professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, v.vahula@gmail.com, ORCID:0000-0001-7973-6421

Abstract. In museum premises located in buildings of architectural monuments, an important issue is the provision of regulatory parameters of the air environment and the method of organizing air exchange in exhibition and exposition halls. In such buildings, it is impossible to conduct air ducts, therefore existing ducts from fireplaces and natural exhaust ducts are used. The National Center of Folk Culture "Ivan Honchar Museum" was considered in the article. After analyzing the architectural drawings of the museum, a displacement ventilation system was chosen to organize air exchange. In displacement ventilation, under the action of lifting force, the air is stratified along the height of the room, due to which the air quality in the service area is higher than in mixing ventilation systems. to ensure the necessary microclimate, two options for the organization of air exchange are proposed. As part of the task, a series of field studies of the parameters of the air environment in the museum premises were conducted with the following parameters: the average air temperature in the premises was within $t_{wz} = 20$ °C, the relative humidity was $\varphi_{wz} = 55-60\%$ in the exhibition halls. The development of the project of the microclimate formation system of museums, which are located in buildings of historical and cultural monuments, requires an individual approach and the implementation of a complex of natural, experimental and theoretical studies of the processes of forming temperature and humidity regimes in the main premises of the museum. A three-dimensional model was created for the study of air exchange and air flow between halls, and air movement was simulated in two variants for rooms No. 40, 47 and 48. Taking into account the field studies and mathematical modeling of air exchange organization options, a project for the modernization of ventilation and air conditioning systems was proposed.

Keywords: Natural research, Preservation of monuments, museum, microclimate, displacement ventilation.

Надійшла до редакції / Received 22.12.2022

УДК 662.767.2

Удосконалення математичної моделі ефективності видобування звалищного газу

О. В. Березюк¹, М. С. Лемешев²

¹д.т.н., доц., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, berezyukoleg@i.ua, www.oberezuk.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-2747-2978

²к.т.н., доц. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, mlemeshev@i.ua, www.lemeshev.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378

Анотація. В місцях захоронення твердих побутових відходів утворюється звалищний газ, основною складовою якого є метан. За ступенем завдання шкоди довкіллю метан вважається другим найшкідливішим парниковим газом, що викидається в атмосферу Землі. Тому удосконалення залежності ефективності видобування звалищного газу від основних параметрів впливу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є удосконалення математичної моделі прогнозування ефективності видобування звалищного газу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Використано метод ротатабельного центрального композиційного планування другого порядку. Отримано удосконалену математичну модель прогнозування ефективності видобування звалищного газу в різних країнах, яка, на відміну від базової, забезпечує більшу збіжність з фактичними даними, містить суттєво меншу кількість коефіцієнтів. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99992, що свідчить про високу достовірність одержаних результатів. Отримана удосконалена регресійна залежність може бути використана з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

Ключові слова: відновлюване джерело енергії, звалищний газ, ефективність видобування, математичне моделювання, планування експерименту, багатофакторна залежність, фактор впливу.

Вступ. Згідно даних, наведених в роботі [1] у світі експлуатується 481 система збирання звалищного газу (ЗГ), який утворюється в місцях захоронення твердих побутових відходів (ТПВ). Загальний видобуток цих систем становить 5,15 млрд. м³ газу на рік. З них 175 установок містяться в країнах ЄС, 264 – в Америці (244 – в США), по 4 – в Австралії та Азії, 2 – в Африці. Але лише близько 25-50 % зібраного ЗГ знаходить комерційне використання, решта спалюється у факелах. Глобальна емісія ЗГ в атмосферу є важливим фактором зміни клімату Землі. Головною складовою ЗГ є метан, емісія якого з територій захоронення ТПВ складає від 1,5 до 70 млн. т/рік [2, 3]. При утилізації метану з усіх полігонів ТПВ в США його кількість становитиме 5 % від загального споживання природного газу в США або 1 % від загального споживання енергоносіїв [1]. За ступенем завдання шкоди довкіллю метан вважається другим після вуглекислого газу найшкідливішим парниковим газом і становить 18 % від загальної кількості парникових газів, що викидаються в атмосферу Землі.

Метан за величиною потенціалу глобального потепління приблизно у 21 раз небезпечніший за вуглекислий газ.

Актуальність дослідження. Необхідність обліку валової емісії метану на даний час визначається зокрема тим, що цей газ є складовою частиною національної квоти речовин, що впливають на парниковий ефект та зміну озонового шару планети. Тому удосконалення залежності ефективності видобування звалищного газу від основних параметрів впливу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища є актуальною науково-технічною задачею.

Останні дослідження та публікації. В роботах [4-6] наведено склад та фізико-хімічні властивості біогазу, що утворюється в місцях захоронення ТПВ. В статті [7] опубліковано склад біогазу, отриманого при анаеробному розкладанні ТПВ для різних співвідношень композиційних сумішей ТПВ-компост та їхньої відносної вологості.

Перспективи та досвід видобування біогазу в

місцях захоронення ТПВ детально описано в роботах [8-10], а в статтях [11, 12] розглянуті особливості його утворення. Вироблений біогаз збирається за допомогою відповідного технічного обладнання і або спалюється безпосередньо на блочній теплоелектроцентралі (ТЕЦ) для електро- і теплопостачання або збагачується до біометану (очищеного біогазу) і подається в існуючу газотранспортну мережу або може використовуватися як паливо в автомобілях на природному газі. Застосування біогазу у децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. Суттєвою перевагою виробництва біогазу є використання поновлюваних джерел енергії, в тому числі ТПВ, вихід біогазу з органічної фракції яких в середньому складає 123 Нм³/т субстрату. Широкий і постійно доступний спектр органічних речовин уможливує постійне і безперервне виробництво біогазу і сприяє економії викопних енергоносіїв [13]. Нижня теплотворна здатність звалищного біогазу становить 16-18 МДж/Нм³ [14]. Авторами роботи [15] розглянуто методи використання біомаси для виробництва теплової енергії. В роботі [16] описано фази розкладання ТПВ, 80 % яких є анаеробними, а також визначено фактори, що впливають на процес біодеструкції відходів.

Автори статті [17] наводять статистичні дані щодо потенціалу ЗГ у різних країнах світу. В роботі [18] наведено математичну модель прогнозування питомого об'єму видобування ЗГ, а в статті [19] опублікована математична модель прогнозування питомого потенціалу ЗГ, на основі яких отримано залежність ефективності видобування ЗГ від основних параметрів впливу [20]:

$$\varepsilon_{3Г} = \frac{\left[25,357 + 7,399 \frac{n_n}{S_{кр}} - 461,2 - 319,3 \left(\frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,2007} - 0,1275 \left(\frac{ВВП}{n_n} \right)^{1,964} - 30,95 \frac{ВВП}{n_n} + 0,00127 \frac{n_n}{S_{кр}} \frac{ВВП}{n_n} - 2284 IP_{ЛП}^{50,07} + 0,03603 \left(\frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,2007} \left(\frac{ВВП}{n_n} \right)^{1,964} - 7,95 \frac{n_n}{S_{кр}} IP_{ЛП} + 32,1 \frac{ВВП}{n_n} IP_{ЛП} + 749,1 \left(\frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,2007} IP_{ЛП}^{50,07} - 0,5987 \left(\frac{ВВП}{n_n} \right)^{1,964} IP_{ЛП}^{50,07} + 3,089 \cdot 10^{-4} \left(\frac{n_n}{S_{кр}} \right)^2 \right] \cdot 100\%}{+ 58,39 \left(\frac{n_n}{S_{кр}} \right)^{0,4014} + 2,706 \cdot 10^{-5} \left(\frac{ВВП}{n_n} \right)^{3,928} + 3525 IP_{ЛП}^{100,14}} \quad (1)$$

де $n_n/S_{кр}$ – густина населення, осіб/км²; $ВВП/n_n$ – ВВП на душу населення, тис. \$/осіб; $IP_{ЛП}$ – індекс розвитку людського потенціалу ($IP_{ЛП} = 0 \dots 1$); n_n – кількість населення країни, осіб; $S_{кр}$ – площа території країни, км².

На нашу думку, залежність (1) є занадто громіздкою і, крім того, вона не може коректно прогнозувати ефективність видобування ЗГ для таких країн, як Україна, оскільки отримана за даними лише для високорозвинуваних країн, а тому вимагає удосконалення.

Формулювання цілей статті. Ціль статті – удосконалення математичної моделі прогнозування ефективності видобування звалищного газу з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

Основна частина. Серед параметрів, які впливають на ефективність видобування ЗГ у різних країнах, розглядалися такі: густина населення країни, величина валового внутрішнього продукту (ВВП) на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу, значення яких наведено в табл. 1. На відміну від абсолютних параметрів, відносні дозволяють порівнювати країни з різними рівнями розвитку економіки та людського потенціалу, кількістю населення та площами території.

Згідно даних табл. 1 методом планування експерименту [21] використовуючи ротатабельне центральне композиційне планування другого порядку виду 2³ за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [22] і детально описана в роботі [23] отримано квадратичне рівняння регресії з ефектами взаємодії 1-го порядку, яке описує удосконалену залежність ефективності видобування ЗГ в різних країнах від основних параметрів впливу і після відкидання незначимих факторів та ефектів взаємодії виглядає таким чином

$$\varepsilon_{3Г} = 2,461 \frac{n_n}{S_{кр}} + 682,4 IP_{ЛП} - 2,577 \frac{n_n}{S_{кр}} IP_{ЛП} - 5,936 \frac{ВВП}{n_n} IP_{ЛП} + 0,06965 \left(\frac{ВВП}{n_n} \right)^2 - 533,55. \quad (2)$$

Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі (2) можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. При цьому коефіцієнт кореляції склав $R = 0,99992$, що свідчить про високу достовірність одержаних результатів.

Виявлено, що за критерієм Стюдента найбільше на ефективність видобування ЗГ в різних країнах, серед досліджених факторів впливу, впливає індекс розвитку людського потенціалу, найменше – ВВП на душу населення.

На рис. 1 показано поверхні відгуків цільо-

вої функції – ефективності видобування ЗГ в різних країнах та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно відобразити отриману залежність (2) та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

Таблиця 1

Об'єми річного видобування, річні потенціали, ефективність видобування ЗГ та фактори впливу на них [2, 17]

Країна	Об'єм видобування ЗГ, млн. м ³ /рік	Потенціал ЗГ, млн. м ³ /рік	Ефективність видобування ЗГ, %	Фактори впливу		
				Густина населення, осіб/км ²	ВВП на душу населення, \$ тис.	Індекс розвитку людського потенціалу
США	500	13000	3,85	31	46,954	0,95
Великобританія	200	2520	7,94	247	46,432	0,942
Нідерланди	50	560	8,93	394	51,657	0,958
Франція	40	874	4,58	114	45,858	0,955
Італія	35	1040	3,37	199,4	39,565	0,945
Данія	5	105	4,76	126,4	34,7	0,952
Україна	18,65	400	4,66	76	7,532	0,786

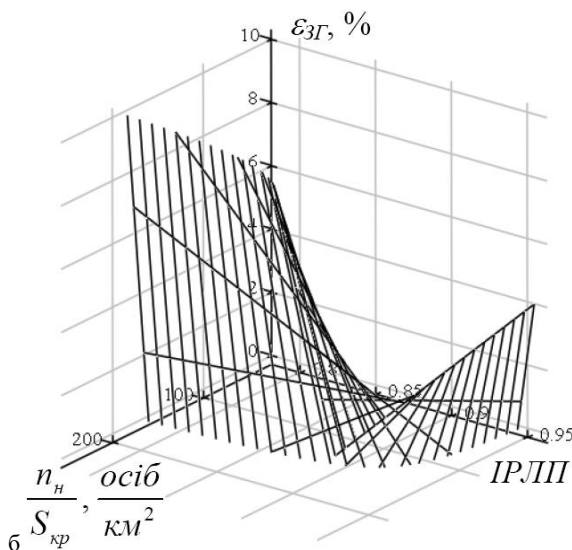
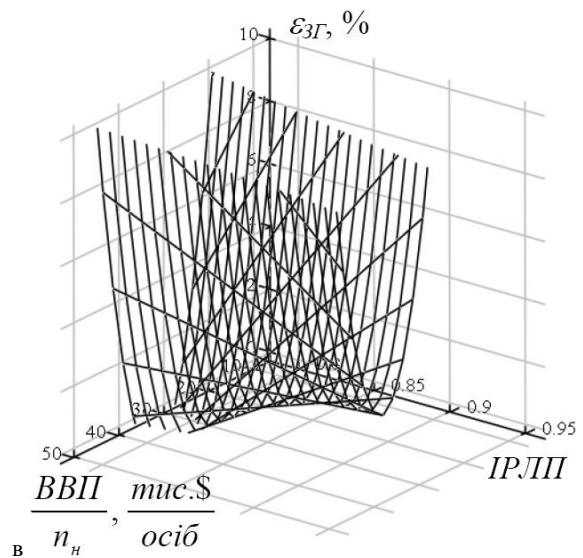
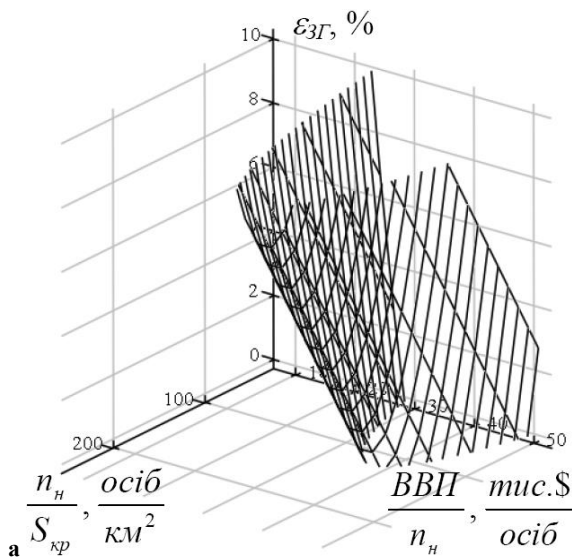


Рис. 1. Поверхні відгуків цільової функції – ефективності видобування $\epsilon_{зг}$ та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу:

а – $n_{н}/S_{кр}$ -ВВП/ $n_{н}$, б – $n_{н}/S_{кр}$ -ІРЛП, в – ВВП/ $n_{н}$ -ІРЛП

Порівняння фактичних та теоретичних даних, отриманих за допомогою базової (1) та удосконаленої (2) математичних моделей, ефективності видобування ЗГ в різних країнах, ранжованих в порядку спадання, наведено на рис. 2, з якого видно, що теоретичні ефективності видобування ЗГ в різних країнах, розраховані за допомогою регресійної моделі (2), несуттєво відрізняються від фактичних даних (табл. 1), що підтверджує визначену раніше високу достовірність отриманої залежності. Крім того, на відміну від базової математичної моделі (1), удосконалена математична модель (2) забезпечує більшу збіжність з фактичними даними, містить

суттєво меншу кількість коефіцієнтів, дозволяє поширити результати прогнозування на такі країни, як Україна.

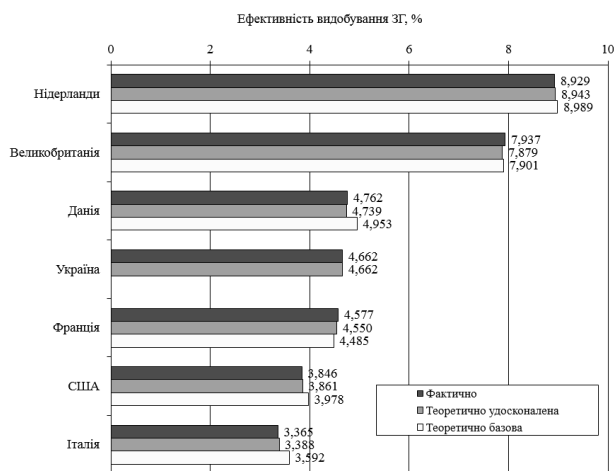


Рис. 2. Порівняння фактичних та теоретичних даних ефективності видобування звалищного газу в різних країнах, отриманих за допомогою базової (1) та удосконаленої (2) математичних моделей

Отже, отримана удосконалена регресійна модель прогнозування ефективності видобування ЗГ в різних країнах (2) може бути використана з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

Висновки. Встановлено, що на ефективність видобування звалищного газу в різних країнах

впливають такі фактори: густина населення країни, величина валового внутрішнього продукту на душу населення, індекс розвитку людського потенціалу. При цьому, найбільше на ефективність видобування звалищного газу в різних країнах, серед досліджених факторів впливу, впливає індекс розвитку людського потенціалу, найменше – ВВП на душу населення.

Отримано удосконалену математичну модель прогнозування ефективності видобування звалищного газу в різних країнах, яка, на відміну від базової, забезпечує більшу збіжність з фактичними даними, містить суттєво меншу кількість коефіцієнтів, дозволяє поширити результати прогнозування на такі країни, як Україна, і може бути використана науковцями та органами управління комунального господарства з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Побудовано поверхні відгуків цільової функції – ефективності видобування звалищного газу в різних країнах та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно відобразити отриману залежність та характер одночасного впливу декількох факторів на цільову функцію.

Перспективи подальших досліджень. Визначення залежності теплотворної здатності звалищного газу від факторів впливу вимагає проведення подальших досліджень.

References

1. Isidorov V. A. *Organicheskaia khimiia atmosfery*. Khimiia, 1992.
2. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia "Prohramy utylizatsii zvalyshchnoho metanu v Luhanskii oblasti za dopomohoiu mekhanizmiv Kitskoho protokolu"*. Luhansk, 2008.
3. Minko O. I., Lifshits A. B. "Ekologicheskie i geokhimicheskie kharakteristiki svalok tverdykh bytovykh otkhodov." *Ekologicheskaia khimiia*, no. 2, 1992, pp. 37-47.
4. Ratushniak H. S., Dzhedzhula V. V. *Enerhozberezhennia v systemakh biokonversii. Navchalnyi posibnyk*. VNTU, 2006.
5. Krasnianskii M. E., Belgasem E. "Ekologicheskie ugrozy svalok TBO." *Tverdye bytovye otkhody*, no. 5, 2005, 12 p.
6. Piatnichko A. I., Zhuk G. V., Bannov V. E. "Rezultaty obsledovaniia poligonov TBO Ukrainy dlia ustanovleniia obiomov dobychi i sostava biogaza." *Tekhnicheskie gazy*, no. 2, 2010, pp. 63-66.
7. Dzhamalova G. A. "Intensifikaciia anaerobnogo razlozheniia modelnykh obraztsov tverdykh bytovykh otkhodov v bioreaktorakh." *Izvestiia SPbGTI(TU)*, no. 23, 2014, pp. 84-86.
8. Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Matveev Yu. B. "Perspektivy proizvodstva i ispolzovaniia biometana v Ukraine." *Analiticheskaia zapiska BAU. – Bioenergeticheskaia asociaciya Ukrainy*, no. 11, 2014, 43 p.
9. Masleeva O. V., Pachurin G. V. "Ekologicheskaia i ekonomicheskaia tselesoobraznost ispolzovaniia biotopliva." *Fundamentalnye issledovaniia*, no. 6, 2012, pp. 139-144.
10. Savickas Yu. Yu. "Opyt ekspluatatsii biogazovykh ustanovok pri anaerobnoi obrabotke organicheskikh otkhodov." *Promyshlennaia teplotehnika*, vol. 23. no. 4-5. 2001. pp. 128-131.
11. Bespalov V. I., Adamian R. G. "Analiz uslovii obrazovaniia biogaza na poligone po zakhoroneniui tverdykh otkhodov potrebleniia." *Inzhenernyi vestnik Dona*, no. 25.2 (25), 2013.
12. Sheina O. A., Sysoev V. A. "Biokhimiia protsessa proizvodstva biogaza kak alternativnogo istochnika energii." *Vestnik TGU*, vol. 14, no. 1, 2009, pp. 73-76.

13. Shults R. *Виробnytstvo i vykorystannia biohazu v Ukraini*. Biznes-tsentr «Ievraziia», 2012.
14. Shmarin S. L. Prohnozuvannia vykydiv parnykovykh haziv z mistv zakhoronennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini. Diss. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho", 2018.
15. Tkachenko S. Y., Bodnar L. A., Yuziuk A. O. "Perspektyvni napriamky vykorystannia biomasy yak dzherela enerhii. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 2, 2011, pp. 68-73.
16. Hodovska T. B., Feshchenko V. P. "Kryterii indyikatoriv vplyvu na ahroekosystemy polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv m. Zhytomyr." *Visnyk ZhNAEU: naukovy-teoretychnyi zbirnyk*, vol. 1, no. 1 (28), 2011, pp. 400-407.
17. Geletukha G. G., Marceniuk Z. A. "Obzor tekhnologii dobychi i ispolzovaniia biogaza na svalkakh i poligonakh tverdykh bytovykh otkhodov i perspektivy ikh razvitiia v Ukraine." *Ekotekhnologii i resursoberezhenie*, no. 4, 1999, pp. 6-14.
18. Bereziuk O. V. "Vyivlennia parametriv vplyvu na pytomyi obiem vydobuvannia zvalyshchnoho hazu." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 3, 2012, pp. 20-23.
19. Bereziuk O. V. "Rozrobka matematychnoi modeli prohnozuvannia pytomoho potentsialu zvalyshchnoho hazu." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 2, 2013, pp. 39-42.
20. Bereziuk O. V. "Modeliuvannia efektyvnosti vydobuvannia zvalyshchnoho hazu dlia rozrobky obladnannia ta stratehii povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 6, 2013, pp. 21-24.
21. Bereziuk O. V. "Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu dlia doslidzhennia vibratsiinoho hidropryvodu ushchilnennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv." *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiiakh*, no. 3 (55), 2009, pp. 92-97.
22. Bereziuk O. V. "Kompiuterna prohrama "Planuvannia eksperymentu" ("PlanExp")." Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir 46876. 21 December 2012.
23. Bereziuk O. V. "Modeliuvannia kompresiinoi kharakterystyky tverdykh pobutovykh vidkhodiv u smittievozi na osnovi kompiuternoї prohramy "PlanExp". *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. no. 6, 2016, pp. 23-28.

UDC 662.767.2

Improvement of the mathematical model of the extraction efficiency of landfill gas

O. Bereziuk¹, M. Lemeshev²

¹Sc.D, associate professor, professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, berezyukoleg@i.ua, www.oberezuk.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-2747-2978

²PhD, associate professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, mlemeshev@i.ua, www.lemeshev.vk.vntu.edu.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378

Abstract. Landfill gas, the main component of which is methane, is formed in places where municipal solid waste is buried. According to the degree of damage to the environment, methane is considered the second most harmful greenhouse gas emitted into the Earth's atmosphere. Therefore, improving the dependence of the efficiency of landfill gas extraction on the main impact parameters in order to increase the prevalence of the use of renewable energy sources, save fossil energy sources and simultaneously reduce the intensity of environmental pollution is an urgent scientific and technical task. The purpose of the study is to improve the mathematical model of predicting the efficiency of landfill gas extraction with the aim of increasing the use of renewable energy sources, saving fossil energy sources and simultaneously reducing the intensity of environmental pollution. The research was carried out by second-order experimental design using the Box-Wilson method using a rotatable central composite design using the developed software, which is protected by a copyright certificate. An improved mathematical model for forecasting the efficiency of landfill gas extraction in different countries was obtained, which, unlike the basic model, provides greater convergence with actual data, contains a significantly smaller number of coefficients. It was established that, according to Fisher's test, the hypothesis about the adequacy of the obtained regression model can be considered correct with 95 % confidence. The correlation coefficient was 0.99992, which indicates the high reliability of the obtained results. The resulting improved regression dependence can be used to increase the prevalence of renewable energy sources, save fossil energy sources, and simultaneously reduce the intensity of environmental pollution. The response surfaces of the target function - the efficiency of landfill gas extraction in different countries and their two-dimensional cross-sections in the planes of influence parameters are constructed, which allow you to visually display the obtained dependence and the nature of the simultaneous influence of several factors on the target function.

Keywords: renewable energy source, landfill gas, extraction efficiency, mathematical modelling, experiment planning, multifactor dependence, influence factor.

Надійшла до редакції / Received 27.12.2022

УДК 697.9

Забезпечення рекомендованої ВООЗ якості повітря в офісних приміщеннях з існуючою системою вентиляції

Л. І. Макаренко¹, О. В. Приймак²

¹асп., Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 2222555@ukr.net.

²д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 02opriymak@gmail.com,
ORCID:0000-0002-3081-6057

Анотація. В умовах зростаючого інтересу до очищення повітря в приміщеннях та посилення рекомендацій ВООЗ щодо концентрація зважених часток в повітрі (не повинна перевищувати 5 мкгр/м³) є необхідність створити зрозумілі правила для розміщення очисного обладнання на системах вентиляції та кондиціонування. Це стосується не лише об'єктів, що тільки проектуються, а й вже експлуатованих об'єктів з функціонуючою системою вентиляції. Адже саме на таких об'єктах є обмежені можливості втручання в роботу не лише інженерних систем, а й експлуатації самої будівлі під час ремонту. Цілями дослідження було отримання даних щодо ефективності очищення повітря в заданому об'ємі при наявній кратності повітрообміну функціонуючої припливно-витяжної системи. Окремим завданням була перевірка заявлених виробником даних щодо перепаду тисків на вбудованому каналному фільтрі HEPA. Найефективнішим способом очищення повітря в приміщеннях від забрудників вважається його усунення від місць постійного перебування людей. Використовуючи загальнообмінну систему вентиляції укомплектовану сучасним фільтрувальним обладнанням можна досягти значних результатів в покращенні якості повітря. В даному випадку розглядається вентиляційна система в офісній будівлі в центрі міста, яку було обладнано додатковим каналним фільтром з фільтрувальною касетою класу MERV16 (або HEPA 11). Така модернізація системи вентиляції за пів року роботи дозволила зменшити забруднення частинками в діапазоні розмірів 0,3 – 10 мкм в повітряному середовищі офісних приміщень на 70...76 % при незначній кратності з дотриманням норм мінімального значення повітрообміну щодо кількості свіжого повітря по санітарній нормі та дозволили уникнути значних капітальних вкладень на ремонт інженерних мереж та втрат щодо неможливості експлуатації будівлі на час ремонту.

Ключові слова: кратність повітрообміну, фільтрування повітря, очищення повітря, фільтр HEPA.

Вступ. Вимоги до якості повітря, при організації систем вентиляції, поступово набувають рис «стандартного пакету» для створення безпечного повітряного середовища в умовах щільної забудови густонаселених міст.

Побаження щодо якості повітря надходять не лише від замовників чи проектувальників нових будівель, а й від мешканців вже збудованих та функціонуючих будівель. Не дивлячись на достатньо невеликий часовий проміжок розвитку питання «якості повітря» в Україні, «географія» застосування цих вимог не обмежена містами: мешканці котеджних забудов за межами міста, так само переймаються якістю повітря в своїх оселях, як і мешканці великих індустріальних міст.

І якщо на етапі проектування (при наявності чіткого технічного завдання та інших вимог) достатньо просто передбачити встановлення, як необхідного обладнання для очищення повітря, так і, скорегувати підбір вентиляційного обладнання з огляду на забезпечення коректної роботи фільтраційного обладнання (наприклад, підбір вентилятора з урахуванням тиску, який буде створювати фільтрувальний елемент), а також заздалегідь узгодити розміщення даного обладнання та передбачити зручний доступ до нього

для постійного планового сервісу. То в умовах функціонуючої будівлі, в більшості випадків, є достатньо обмежені можливості втручатися в роботу вже існуючих систем, без внесення значних змін їх конструктивної будови, наслідком яких можуть бути зміни не лише системи вентиляції, а наприклад, і системи електропостачання чи водопостачання та каналізації.

Основною вимогою є отримання можливості відслідковування та впливу на параметри внутрішнього повітряного середовища в приміщеннях з існуючими інженерними мережами без значних капітальних вкладень, не тільки на модернізацію цих інженерних мереж, а й, капітальних вкладень в ремонт всієї будівлі, такі як, виділення нових технічних приміщень для розміщення додаткової кліматичної техніки, яка б надала змогу контролювати необхідні показники.

Перелік застосувань, які можна використати для рішення поставлених питань, залежить лише від власних побажань замовника (наприклад, побаження прибрати запах тютюну чи знизити концентрацію алергенів від домашніх тварин) та вихідними параметрами зовнішнього та внутрішнього повітряного середовища.

В методичних рекомендаціях Центру з контролю та профілактики захворювань у США

(CDC) наведена «піраміда інфекційного контролю», що включає в себе методи боротьби з повітряним забруднювачем, таким як COVID-19, від найбільш ефективних, а саме усунення забруднення (або патогену), інженерний контроль (розділення людей та патогенів), адміністративний контроль (інструктаж людей) та персональні засоби захисту (використання масок, халатів, рукавичок тощо).

Одним з найефективнішим способів вважається усунення патогену від місць постійного перебування людей. Тож, яким чином можна забезпечити цю умову?

Найкращі результати по вловлюванню з повітря часток різних фракцій показали рециркуляційні агрегати з HEPA-фільтрами [1], [2], [3], [4]. Використання портативних повітроочищувачів з фільтрами HEPA, дозволяє вирішити питання:

- 1) тимчасової рециркуляція повітря в приміщеннях без загальнообмінної вентиляції (наприклад, під час ремонту загальнообмінної системи вентиляції);
- 2) додаткової системи рециркуляції повітря з фільтрацією повітря, для створення необхідної кратності повітрообміну в приміщеннях;
- 3) забезпечення підвищеної ефективності очищення повітря.

Але це обладнання не задовольняє вимоги щодо нормативної санітарної кількості свіжого повітря. Тож, в приміщеннях з постійним перебуванням людей необхідно організувати загальнообмінну вентиляцію з розрахунку на санітарну норму свіжого повітря для дихання людей в поєднанні з вказаними очисними системами.

Актуальність дослідження. Даним дослідженням здійснено спробу визначення впливу вискоелективних фільтрів твердих частинок на якість повітря в будівлі, застосовуючи в даному випадку фільтрувальні елементи встановлені на припливному повітроводі існуючої системи вентиляції офісної будівлі. Дослідити вплив вискоелективного фільтра на аеродинамічні показники системи вентиляції та підвищення її енергоспоживання.

Останні дослідження та публікації. В більшості, фільтри для систем вентиляції та кондиціонування не видаляють з повітря всі частки. Навіть HEPA-фільтри класу H11-H13 не затримують частки менші 3 мкм, до яких входять і мікроорганізми. На ефективність фільтрації повітроочисником впливають як його конструкція, так і підбір секцій фільтрації та умови використання повітроочисника виходячи з фізичних параметрів оточуючого повітряного середовища та

фізичного розташування згідно геометричних параметрів приміщень, які він обслуговуються.

В дослідженні Сао та ін. [5] проведено порівняння систем для очищення повітря в приміщенні об'ємом 185,5 м³, а саме: припливна установка з фільтром MERV 15 (ефективність очищення часток 0,3-1,0 мкм до 94 %) потужністю 500 м³/годину (0,142 м³/с) може зменшити кількість частинок у приміщенні на 56,5 % за перші 15 хвилин роботи; фанкойл з повітряним фільтром MERV 13 (ефективність очищення часток 0,3-1,0 мкм до 75 %) потужністю 1274,4 м³/годину (0,354 м³/с) може зменшити кількість частинок у приміщенні на 75,1 % за перші 15 хвилин роботи та переносний повітроочисник типу Oreck AirInstinct (модель AIR108) оснащений вискоелективним фільтром твердих частинок повітря HEPA (ефективність очищення часток 0,3-1,0 мкм до 99,97 %) концентрація частинок може бути зменшена на 41,8 %, 59,0 %, 79,7 % і 90,0 % для сценаріїв з одним очисником, двома очисниками, чотирма очисниками та шістьма очисниками відповідно. Це дослідження показує, що навіть якщо кімната не має системи припливної вентиляції або внутрішнього блоку кондиціонера з системою фільтрації, концентрацію частинок у приміщенні все одно можна досить швидко зменшити, розмістивши достатню кількість переносних повітроочисників з фільтрами HEPA.

Результати роботи Jones та ін. [6] виявили, що заміна фільтрів з MERV 8 на MERV 14 або 15 мало більший вплив на зниження рівня PM_{2,5} у приміщенні, ніж регулювання кратності зовнішнього повітря. У цій роботі виміряли PM_{2,5} у приміщенні безперервно протягом одного року в 37 міських комерційних офісах з механічною або змішаною вентиляцією в Китаї, Індії, Великобританії та США. У цьому аналізі фільтри MERV 13-14 і фільтри MERV 15+ зменшили вміст PM_{2,5} у приміщенні на 30,9 % і 39,4 % відповідно порівняно з фільтрами MERV 7-12, тоді як вплив швидкості повітрообміну (кратність зростає з 1,0 год⁻¹ до 2,4 год⁻¹ до 5,4 год⁻¹) коливалась від 13,6 % до 30,0 %.

Для офісних будівель в звіті №23 ЕСА (Європейська спільна дія щодо «Міського повітря, внутрішнього середовища та впливу на людину») [7] пропонують рівень вентиляції, який підтримується на рівні та вище 10 л/с на людину (36 м³/годину), як такий, що в середньому призведе до значного зменшення у мешканців симптомів «хвороби будівлі» і покращення якості повітря. Для інженера-проектувальника рекомендують використовувати витрату свіжого повітря в офісному приміщенні на людину з розрахунку

$q_v = 12,5$ л/с на людину (45 м³/годину), якщо немає можливості вимірювати дані концентрації СО₂ в приміщеннях.

Що узгоджується з даними додатку Х, ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» при застосуванні мінімальних розрахункових коефіцієнтів – 40 м³/годину на людину.

Тож, виходячи з усього наведеного вище, можна зробити висновок, що необхідною умовою створення якості повітря в приміщеннях є поєднання визначеної кількості свіжого повітря, як санітарної норми для дихання, та застосування фільтрів класу HEPA (або MERV) для ефективного очищення повітря в системах вентиляції.

Формулювання цілей статті. Вивчення впливу високоефективного фільтру на показники якості повітря в офісних приміщеннях, при розміщенні його на мережі припливних повітроводів існуючої системи вентиляції в умовах постійної експлуатації цієї системи.

Розглядався каналний очищувач повітря IQAir Perfect 16 [8]. Одним з завдань є перевірка перепаду тисків на фільтрі при роботі припливно-витяжного агрегату в умовах працюючого об'єкту.

Основна частина.

Виміри проводилися на першому поверсі будівлі за адресою площа Арсенальна в м. Київ в офісних приміщеннях: кабінетів площею 49,3 м² та 51,1 м²; рецепції площею 40,5 м². Інші приміщення, не розглядалися, так як вони не обслуговуються системою припливно-витяжної вентиляції, яка буде облаштована високоефективним фільтром. Висота приміщення 3,0 м.

В приміщеннях встановлена припливно-витяжна система вентиляції потужністю 1000 м³/годину з розрахунковим вільним тиском (на мережу повітроводів) 300 Па. Для очищення зовнішнього повітря на припливній секції установки та для очищення витяжного повітря з приміщень встановлені фільтри класу – G4.

Для вимірювання даних використовувалися такі прилади:

- датчик перепаду тиску SPS-G-2KO;
- анемометр ET-965;
- датчик частинок Particle Scan Lite, IQAir. Serial nr.:2005.30837. Flow 0,025 cfm.

На припливному повітроводі по руху повітря після припливно-витяжної установки змонтовано каналний очищувач повітря IQAir Perfect 16. Габаритом ШхВхД 54х54х64 см. Вагою 27 кг. Заявлені виробником параметри очищення: >95 % для часток 0,3 мкм і ≥75 % для частинок 0,03 мкм і більше. Площа

фільтруючого матеріалу в перерізі – 16 м². Мінімальний показник ефективності – MERV16 (відповідник типу фільтру класу HEPA H11).

Вимірювання проводилися 20 листопада 2021 року при внутрішній температурі +21,2 °С, відносній вологості в приміщенні 32 % при ввімкненій системі вентиляції до установки фільтру (для отримання вихідної інформації щодо стану інженерних систем та чистоти повітря в приміщеннях) та 13 лютого 2023 року при внутрішній температурі +21,5 °С, відносній вологості в приміщенні 28 % з діючою системою вентиляції (рис.1) з фільтром Perfect 16 (система проробила більше півроку після переобладнання). Перед замірами 13.02.23 було проведено сервісне обслуговування і всі фільтри (рис. 2) були замінені на нові.

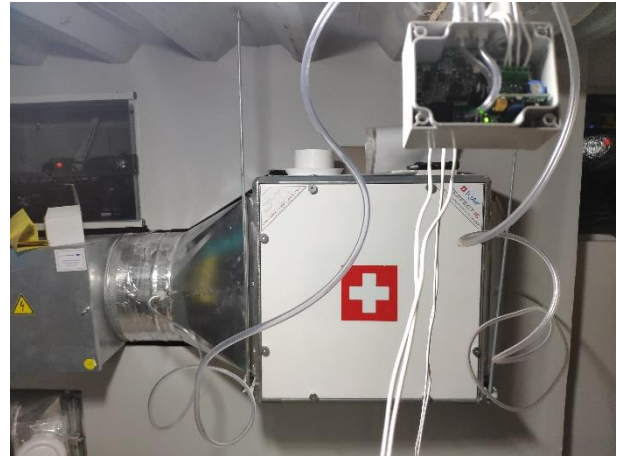


Рис.1. Вбудований фільтр Perfect 16 в існуючу систему повітроводів припливно-витяжної системи з під'єднаним датчиком перепаду тиску SPS-G-2KO.



Рис.2. Брудний фільтр (термін використання 1 місяць) та чистий фільтр G4.

Результати натурних вимірів кількості повітря, що надходить до приміщень від діючої вентиляції в порівнянні з необхідною кількістю повітря згідно норм вказано в табл. 1. Окремо, в

табл. 1 вказано мінімальні значення повітрообміну для якісного очищення приміщень згідно рекомендацій для встановлення вискоєфективних фільтрів. Як видно з порівняння, повітрообмін в приміщеннях не досягає рекомендованої мінімальної кратності 2...6. Наявна кратність в приміщеннях від 0,7 до 1,5 крат. Але навіть при таких значеннях кратності повітрообміну, фільтр встановлений на систему вентиляції за 6 місяців дозволив зменшити кількість забруднювачів в приміщеннях на 70..76 % (рис.3).

Проведений аналіз якості повітря на забруднення зваженими частками до 0,3 мкм і більше до та після модернізації зведено в табл. 2.

Дані щодо перепаду тисків до та після фільтру при роботі вентиляційної системи перевірялись окремо. В аналогів перепад тиску на фільтрах HEPA від 150 Па (початковий) до 450 Па (кінцевий).

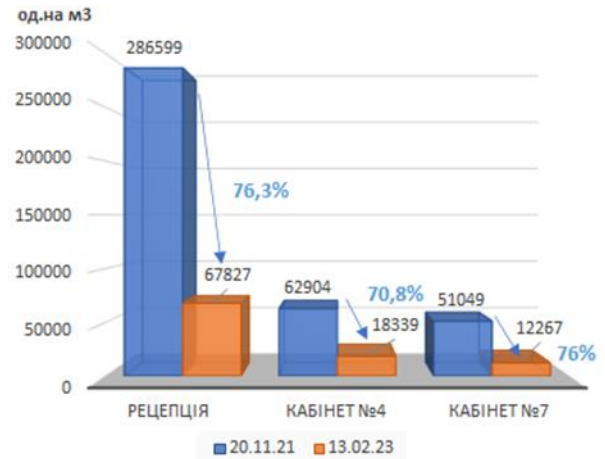


Рис.3. Показники очищення повітря в приміщенні з 20.11.21 по 13.02.23 до та після модернізації системи вентиляції фільтром Perfect 16 ID-2225 з MERV16.

Таблиця 1.

Повітряний баланс для приміщень з припливно-витяжною вентиляцією з вбудованим фільтром Perfect 16 ID-2225 з фільтрувальною вкладкою MERV16.

Номер п/п	Призначення приміщення	Об'єм приміщення, м³	Повітрообмін при механічній вентиляції*, м³/годину			Мінімальний повітрообмін для ефективного очищення повітря за допомогою фільтру IQAir Perfect 16		
			приплив	викид	Кратність, год ⁻¹	Кратність, год ⁻¹	Кількість повітря, м³/годину	
№1	Рецепція	154	нормативний	120	120	0,7	2...6	308...924
			фактичний	110	90			
№4	Кабінет директора	138	нормативний	180	180	1,5	2...6	276...828
			фактичний	201	197			
№7	Кабінет директора	194	нормативний	180	180	1,1	2...6	388...1164
			фактичний	209	215			

* (при тін.40м3/годину на 1 працюючого, а в кабінетах директора при тін.180м3/годину) згідно Додатку X, ДБН ДБН В.2.5-67:2013.

Таблиця 2.

Показники очищення повітря в приміщенні з 20.11.21 по 13.02.23 до та після модернізації системи вентиляції фільтром Perfect 16 ID-2225 з фільтрувальною вкладкою MERV16.

Призначення приміщення	Аналіз якості повітря	Аналіз якості повітря	Рівень зниження забруднення повітря в заданому об'ємі приміщення
	Дата 20.11.2021	Дата 13.02.2023	13.02.2023
	одиниць в м³	одиниць в м³	%
Рецепція	286599	67827	76,3
Кабінет №4	62904	18339	70,8
Кабінет №7	51049	12267	76,0

Виробник заявляє перепад тиску на фільтрів в 44 Па при 2040 м³/час при швидкості повітря в перерізі фільтру 2,5 м/с. Існуюча система вентиляції розрахована на 1000 м³/час, швидкість повітря в перерізі фільтру складає близько 1,0 м/с. Заміри проводилися датчиком перепаду тиску SPS-G-2КО. При температурі повітря в повітроводі 17,4 °С...17,8 °С. Вологість заміряна не була. Тиск до фільтру склав 220 Па. Після – 197 Па. Таким чином перепад на фільтрі складає 23 Па. Що відповідає заявленим даним виробника. Це дозволило використати цей фільтр на існуючій системі вентиляції, без зміни потужності вентилятора (щоб компенсувати створений фільтром тиск в системі), та модернізації системи електропостачання, на під'єднання вентилятора більшої потужності.

Висновки. Встановлено, що система вентиляції подає достатньо повітря згідно існуючих норм, але цього недостатньо щоб організувати необхідну кількість зміни об'ємів повітря в годину для забезпечення очищення повітря.

При існуючому стані ремонтних робіт на об'єкті (готова конструкція стелі з мінімальним доступом) є обмежена можливість внесення змін в систему вентиляції. Але при виконанні навіть цих змін мікроклімат приміщення можна привести до бажаного стану чистоти. В даному випадку

при кратності 0,7...1,5 в офісних приміщеннях при постійній роботі системи з фільтрацією за пів року можна досягти зменшення забруднення частинок в діапазоні розмірів 0,3 – 10 мкм в повітряному середовищі на 70-76 %. При чому, низький показник перепад тиску в 23 Па дозволив встановлення фільтру в систему, не спричинивши значних змін в конструкції самої системи вентиляції, що, у свою чергу, не вплинуло на інші інженерні системи.

Перспективи подальших досліджень. Необхідні подальші дослідження в функціонуючих офісних приміщеннях з відслідковуванням моменту збільшення концентрації забруднювачів та можливості реагування системи вентиляції: в часі відслідковувати зміни концентрації забруднювачів при роботі системи для аналізу зміни повітряного середовища та реагування на ці зміни (вмикання-вимикання вентиляції, заміна фільтрів, зміна кількості повітря по приміщеннях). Визначення залежності очищення в фільтрі НЕРА від зміни температури, вологості та швидкості руху повітря в перерізі фільтру в наших кліматичних умовах.

Подяки. Роботу виконано за сприяння виробничих та апаратних потужностей ТОВ "ІСК АКСОН" в особі Ігора Кліндюка та консультативного супроводу Сергія Пендели.

References

1. Offermann, F.J., Sextro, R.G., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Nazaroff, W.W., Nero, A.V., Revzan, K.L. and Yater, J. (1985). Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners, *Atmos. Environ.*, 19, 1761–1771.
2. Christopherson, D. A., Yao, W. C., Lu, M., Vijayakumar, R., and Sedaghat, A. R. (2020). High-Efficiency Particulate Air Filters in the Era of COVID-19: Function and Efficacy. *Otolaryngol. Head Neck Surg.* 163 (6), 1153–1155. doi:10.1177/0194599820941838.
3. Kelly, F.J, Fussell, J.C, Improving indoor air quality, health and performance within environments where people live, travel, learn and work, *Atmospheric Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.058>. 2018.
4. Mudiya, Pavan Kumar, "Experimental Testing and Performance Analysis of "Room Air Cleaners"" (2008). ETD Archive. 427. <https://engagedscholarship.csuohio.edu/etdarchive/427>.
5. Cao, Q., Kuehn, T.H., Kim, S.C., Ou, Q., Pei, C., Pui, D.Y.H. (2021). An Experimentally Validated Analytical Model for Aerosol Number Concentration Reduction in Classrooms. *Aerosol Air Qual. Res.* 21, 210038. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210038>
6. Emily R. Jones, Jose Guillermo Cedeno Laurent, Anna S. Young, Piers MacNaughton, Brent A. Coull, John D. Spengler, Joseph G. Allen. The effects of ventilation and filtration on indoor PM2.5 in office buildings in four countries. *Building and Environment* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107975>.
7. Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy, Report No 23. EUR 20741 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. ECA (European Collaborative Action on, "Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure"). ISBN 92-894-5664-7. © European Communities, 2003. https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Inive/ECA/ECA_Report23.pdf
8. Сайт IQAir. © 2022 IQAir. <https://www.iqair.com>

UDC 697.9

ENSURING NORMAL AIR QUALITY IN OFFICE PREMISES WITH THE EXISTING VENTILATION SYSTEM.

L. Makarenko¹, O. Priymak²

¹Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2222555@ukr.net.

²Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02opriymak@gmail.com, ORCID:0000-0002-3081-6057

Abstract. In the conditions of growing interest in indoor air cleaning and strengthening WHO recommendations regarding the concentration of suspended particles in the air (should not exceed $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), there is a need to create clear rules for placing cleaning equipment on ventilation and air conditioning systems. This applies not only to objects that are just being designed, but also to already operated objects with a functioning ventilation system. After all, it is precisely at such objects that there are limited opportunities to intervene in the work of not only engineering systems, but also the operation of the building itself during repairs. The goals of the study were to obtain data on the efficiency of air purification in a given volume with the available air exchange rate of a functioning supply-exhaust system. A separate task was to check the data declared by the manufacturer regarding the pressure drop on the built-in HERA channel filter. The most effective way to clean indoor air from pollutants is considered to be its removal from places of permanent residence of people. Using a general exchange ventilation system equipped with modern filtering equipment, you can achieve significant results in improving air quality. In this case, the ventilation system in an office building in the city center is considered, which was equipped with an additional channel filter with a MERV16 (or HEPA 11) class filter cassette. This modernization of the ventilation system in half a year of operation made it possible to reduce pollution with particles in the size range of 0.3-10 microns in the air environment of office premises by 70...76 % with an insignificant multiplicity in compliance with the norms of the minimum value of air exchange in terms of the amount of fresh air according to the sanitary norm and allowed to avoid significant capital investments for the repair of engineering networks and losses due to the impossibility of operating the building during the repair. The conclusions of the study need to be checked in office premises with an existing ventilation system when recording a gradual decrease in the concentration of pollutants in the premises during the operation of the system in order to determine the optimal multiplicity to achieve the specified air quality when using filters.

Keywords: air exchange rate, air filtration, air purification, HEPA filter.

Надійшла до редакції / Received 29.12.2022

УДК 696.2

Особливості експлуатації інженерних систем будівель під час воєнного стану

Ю. Й. Франчук¹, В. А. Коновалюк²

¹ к.т.н., ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, franchuk.yy@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-7910-8705

² к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, konovaliuk.va@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-5115-7188

***Анотація.** Руїнування інженерних систем будівель і споруд, періодичні пікові навантаження, що утворюються під час воєнних дій, істотно впливають на стабільність роботи цих систем. Необхідність виконувати ремонтні і налагоджувальні роботи в аварійному режимі в найкоротший термін не завжди узгоджується з чинними вимогами з охорони праці, які розроблялися для умов експлуатації інженерних мереж в мирний час. Враховуючи наявний і відтермінований вплив пошкоджень на роботу інженерних систем є необхідність врахувати наявні умови в нормативних документах, які в подальшому можуть бути використанні при форс мажорних обставинах. При вибухах поблизу газопроводів утворюється динамічні коливання, подібні до робіт по забиванню паль при будівництві. В такому випадку «Правила безпеки систем газопостачання» вимагають здійснювати перевірку міцності стиків по всій довжині впливу плюс 20 м. Часто пошкодження газопроводу від вибуху призводить до його зміщення по вертикалі й горизонталі. Тому виникає необхідність перевіряти фізичним методом контролю найближчі від місця пошкодження зварні стики. При виявленні дефекту у стиках необхідно обов'язково перевіряти і наступний стик газопроводу. Крім наскрізних пошкоджень існує вірогідність пошкоджень тільки ізоляційного покриття. Так як фізично оглянути підземний газопровід неможливо, необхідно використовувати приладний метод виявлення таких пошкоджень. Необхідно проводити позачергове приладове обстеження, на підставі якого визначаються ділянки, які потребують додаткової ізоляції. Повинна здійснюватися перевірка і додаткова герметизація інженерних вводів і випусків підземних комунікацій. В будівлях повинен здійснюватися контроль мікроконцентрацій чадного газу та контроль довибухових концентрацій метану.*

Ключові слова: газопостачання, димовидалення, газонебезпечні роботи, комплексне приладове обстеження, ремонт газопроводу.

Вступ. Існуючі реалії, які створилися в Україні особливо після 24 лютого 2022 року, значно ускладнили експлуатацію інженерних мереж, насамперед систем електро-, газо- і теплопостачання та внутрішньобудинкових інженерних систем. Нестабільність подачі енергії, руїнування елементів інженерних систем, пошкодження ізоляційних покриттів призводить до виникнення аварійних ситуацій, ускладнень в роботі промислових підприємств і зниженні комфортності перебування в будівлях.

Актуальність дослідження. Для забезпечення функціонування економіки та комфортних умов життєдіяльності населення, газорозподільні системи повинні забезпечувати надійну і безперебійну подачу газу і в умовах воєнного стану. В результаті обстрілів відбувається руїнування ділянок газопроводів, що призводить не тільки до припинення газопостачання, але й до загрози утворення вибуху чи пожежі.

Останні дослідження та публікації. Чинне законодавство регламентує проведення газонебезпечних робіт на газопроводах лише в мирний час. Порядок виконання робіт з забезпеченням вимог охорони праці передбачається в [1, 2, 4, 5].

Крім того на кожному підприємстві з газопостачання розроблені інструкції з охорони праці

при виконанні таких робіт, виробничі та посадові інструкції тощо. Ці нормативи під час дії воєнного стану не завжди актуальні. Питання потребує доопрацювання.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є аналіз технічного стану інженерних систем, характерних пошкоджень та руїнувань та надання пропозицій для забезпечення надійного енергопостачання.

Основна частина. Газові мережі України в основному побудовані в минулому сторіччі, вони забезпечують третину потреби країни в енергії і являються об'єктами підвищеної небезпеки. Роботи, пов'язані з оглядом, чисткою, ремонтом газопроводів і технологічного обладнання при проведенні яких можливе виділення в робочу зону шкідливих парів і газів, які можуть визвати загорання та шкідливий вплив на людину називаються газонебезпечними. При проведенні таких робіт існує ймовірність утворення вибуху та пожежі. В умовах експлуатації інженерних мереж в мирний час завдяки виконанню планованих та поточних робіт (рис. 1) забезпечується необхідний рівень безпечності та надійності роботи газових систем.

Для цього складаються графіки обслуговування та ремонту систем, які враховують вимоги

нормативних документів, вимоги паспортів заводів-виготовлювачів обладнання, технічного стану мереж, їх віку тощо.



Рис. 1. Обстеження газопроводів

За перші три місяці російського вторгнення в Україні знищено більше 5 тис. км газорозподільних мереж (рис. 5, 6), та зруйновано 6 тис м² будівель (рис. 2, 3).



Рис. 2. Руйнування газифікованих приватних будівель



Рис. 3. Руйнування газифікованих багатоповерхових будівель

Через бойові дії було відключено і пошкоджено 1074 газорозподільних та 2739 шафових газорегуляторних пунктів. Фахівці Операторів ГРМ відновили роботу 390 газорозподільних та 929 шафових пунктів.

Тільки за перші півтора місяці воєнних дій

отримали пошкодження наступні об'єкти ГТС України: три магістральні газопроводи, дві газорозподільні станції, зупинено сорок вісім газорегуляторних станцій та чотири компресорні станції захоплено окупантами.

Крім того, більше 300 тисяч домогосподарств залишилися без газопостачання [10].

В силу необхідності постійного отримання енергії газові мережі мають стабільно працювати в т.ч. і під час воєнного стану. В цей період значно зростає ймовірність пошкодження чи ураження об'єктів критичної інфраструктури, в т.ч. газової (рис. 4, 5), а отже разом з відсутністю стабільного газопостачання зростає загроза вибуху чи пожежі. Підвищуються рівень небезпеки для людей, які перебувають поблизу.



Рис. 4. Пошкодження сталевого газопроводу



Рис. 5. Пошкодження поліетиленового газопроводу

Діюче законодавство регламентує проведення газонебезпечних робіт на газопроводах лише в мирний час. Вказаними роботами мають право керувати та їх виконувати лише висококваліфіковані фахівці які пройшли медогляд, навчання та здали іспити з питань охорони праці. З

числа інженерно-технічних працівників назначаються відповідальні за технічний стан об'єктів газопостачання та газоспоживання.

В умовах реалій сьогодення в Україні інфраструктура часто зазнає пошкоджень та руйнувань. Це стосується також і підземних газопроводів (рис 6, 7).



Рис. 6. Розкопка пошкодженого газопроводу



Рис. 7. Ремонт пошкодженого газопроводу

Газонебезпечні роботи необхідно виконувати у світлий час доби, а при ліквідації наслідків аварійної ситуації – цілодобово. Здійснення ремонту, електрогазозварювання та різання газопроводів необхідно проводити під надлишковим тиском 40-150 даПа. (п. 7.30 [2]).

Дозволяється на пошкоджену ділянку газопроводу для тимчасового припинення витoku газу накладати муфту або хомут. Це забезпечить усунення витoku і необхідний рівень герметичності. Проте потрібно забезпечити щоденний огляд цього з'єднання (1.27 [2]).

Пошкоджені ділянки газопроводів, каверни глибиною понад 30 % від товщини труби необхідно ремонтувати шляхом вирізання дефектних ділянок і зварювання котушок довжиною, що відповідає діаметру труби, але не менше ніж 200 мм (рис. 8).



Рис. 8. Зварювання котушки в підземний газопровід

Часто пошкодження газопроводу від вибуху супроводжуються одночасно і їх зміщенням по вертикалі і горизонталі. Тому виникає необхідність відкривати і перевіряти фізичним методом контролю найближчі з обох боків від місця пошкодження зварні стики. При виявленні дефекту у стиках перевіряється наступний стик газопроводу (п. 1.28 [2]).

Перед початком проведення ремонтних робіт на сталевих підземних газопроводах, пов'язаних із роз'єднанням газопроводу, з метою запобігання іскроутворення, необхідно вимкнути засоби електрозахисту і встановити на роз'єднувальних ділянках газопроводу шунтувальні перемички з кабелю. Або проводити роботи тільки після продування газопроводу повітрям.

Як правило, підземний газопровід після вибухів візуально оглянути неможливо і тому є висока імовірність що сама сталева труба не зазнала руйнувань, а пошкодження отримало лише ізоляційне покриття газопроводу. У випадку не усунення пошкодження покриття сталевий газопровід зазнаватиме інтенсивної корозії, що приведе до витoku газу та виходу газопроводу з ладу. Тому потрібно провести позачергове КПО і використовувати його результатами при плануванні і виконанні ремонтних робіт (рис. 9, 10).

Динамічні навантаження, що утворюються від вибухів снарядів можна приблизно порівняти з навантаженнями, що утворюються при виконанні робіт по забиванню паль (шпунтів). Керуючись п. 1.34 [2] такі роботи допускається проводити на відстані не ближче ніж 30 м від газопроводу і після їх закінчення всі відкриті зварні стики сталевих газопроводів необхідно перевіряти фізичними методами контролю. Так як фактичні динамічні навантаження від вибухової хвилі можуть перевищувати вищезгадані навантаження, то перевірка герметичності стиків приладовими методами набуває ще більшу актуаль-

ність. Стики необхідно перевіряти по всій довжині вибухів плюс 20 м від крайнього.



Рис. 9. Розкриття контрольних шурфів

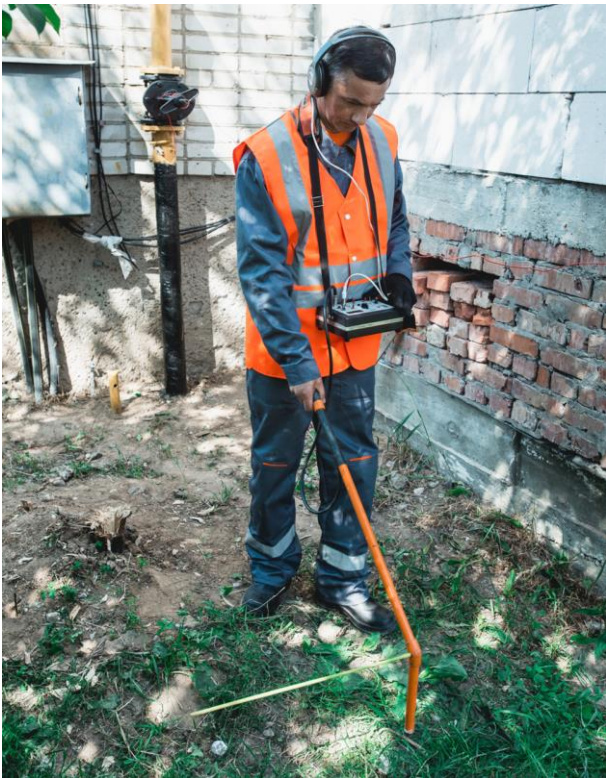


Рис. 10. Приладне обстеження стану підземних газопроводів

Доцільно пошкоджені ділянки сталевих газопроводу замінювати поліетиленовим використовуючи переходи «поліетилен-сталь» (рис. 11). При цьому необхідно забезпечити певний потенціал на сталевих підземних ділянках газопроводу.

Ремонт пошкоджених зварних з'єднань і механічних пошкоджень поліетиленових газопроводів проводиться шляхом вирізання дефектних ділянок і зварювання поліетиленових котушок довжиною не менше 500 мм. З'єднання виконуються за допомогою терморезисторного зварю-

вання. У випадку виявлення нещільностей у переході поліетилен-сталь його вирізають і замінюють новим. Якість відновленого з'єднання визначається перевіркою герметичності приладовими методами, мильною емульсією та пневматичним випробуванням.

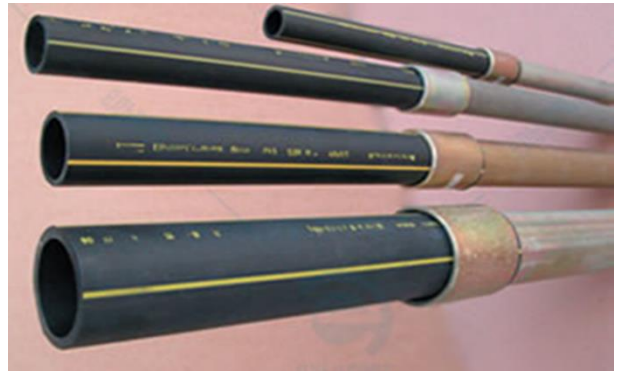


Рис. 11. Переходи «поліетилен – сталь»

Ретельної уваги потребує герметизація інженерних вводів від газопроникнення. Крім мережного газу в ґрунті може бути газ біологічного походження від бродіння біологічних матеріалів та «болотний газ». При виявленні ознак загазованості складно зразу визначити тип газу. Однозначну інформацію про тип газу може надати лише спеціалізована лабораторія провівши аналіз газу в відсотковому відношенні. Детальний опис діагностування витоків газу проведений в роботі [3].

Як правило, мережний газ повинен мати не менше 90 % метану, до 3 % пропану, до 7 % бутану, до 6 % вуглекислого газу, до 1 % кисню, до 20 мг/м³ сірководню тощо. В інших газах відсоток метану значно нижчий, збільшується доля сірководню і вуглекислого газу. Описані гази перетікаючи вздовж траси підземних трубопроводів, через щілини, тунелі тощо можуть потрапляти в будівлі.

В силу вказаних причин значну увагу потрібно приділяти герметизації вводів і випусків інженерних підземних комунікацій (рис. 12, 13).

Це проводить власник з оформленням акту де зазначається стан мереж. В час війни при обстрілах територій, мереж трубопроводів імовірність витoku різного роду газів зростає, а герметичність інженерних вводів і випусків зменшується. Постає питання додаткового контролю вмісту газу.

У діючих будівельних нормах (п. 9.49; 9.56 [1]) передбачається контроль мікроконцентрацій чадного газу (0,005 об'ємних відсотків СО) та контроль довибухових концентрацій газу шляхом встановлення сигналізаторів у підвалах, технічних підпіллях, а за відсутності підвалів та

технічних підпілля – в цокольних та перших поверхах. Рекомендується застосовувати схему контролю концентрацій газу, наведену на рис. 14.



Рис. 12. Ввід інженерних мереж в будинок



Рис. 13. Ущільнення вводів в будинок

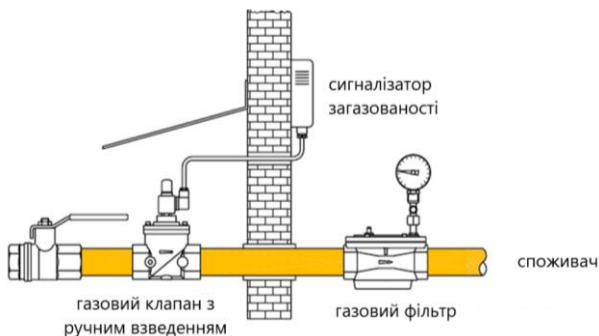


Рис. 14. Схема контролю концентрацій газу

Відповідно до п. 5.10 [2] власник будівель відповідає за утримання в належному стані ввідів підземних комунікацій в підвалах будинків, а також місць перетинів газопроводами елементів будинків.

Умови для технічного обслуговування забезпечує власник будівель. Несправне газове обладнання відключається з встановленням заглушок та оформленням відповідного акту представником експлуатаційної організації. Після проведення капітального ремонту, як і при заселенні газифікованих будинків, працівник газорозподільного підприємства проводить інструктаж із безпечної експлуатації газового обладнання власників будинків.

Прокладання газопроводів всередині будинків і споруд має бути відкритим. На цей час дозволяється приховане прокладання газопроводів (крім газопроводів скрапленого вуглеводневого газу) всередині будинків усіх призначень у шахтах або каналах стін, що закриваються щитами, які легко знімаються та мають отвори.

При будівництві внутрішніх газопроводів використовують сталеві труби. На цей час допускається використання труб із міді (згідно з вимогами ДСТУ-Н Б В.5.5-42), що з'єднуються між собою, а також з фітингами методом зварювання, твердого капілярного паяння або механічного пресування.

При проходженні вибухових хвиль відбувається значне динамічне навантаження на підземні газопроводи, що призводить до утворення прихованих пошкоджень як самої труби, так і ізоляційного покриття, які бажано мати можливість визначати неруйнівним методом. Необхідно позачергово проводити контроль стану газопроводів приладовим методом на: герметичність, контакт з землею і стан ізоляційного покриття.

У [2] зазначено, що у будинках, які обладнані приладами апаратами з відводом продуктів згорання в димоходи, забороняється влаштування витяжної вентиляції з штучним спонуканням.

В процесі тривалої технічної експлуатації житлових будинків у блоках димових та вентиляційних каналів у перестінках, які відгороджують димові канали один від одного утворюються мікротріщини, що порушує герметичність і відокремленість димоходу, тобто димовий канал стає нещільним. Під час включення механічних витяжок не відбувається процес природньої витяжки, проходить процес перетоків продуктів згорання через утворені нещільності у суміжні димоходи та вентиляційні канали, в результаті чого утворюється «зворотня тяга». При виключеній механічній витяжці від електроживлення із зміною напрямку вітру вентилятор може працювати не на витяжку, а на приплив, в результаті чого продукти згорання можуть потрапити у приміщення.

На вентиляційних каналах слід встановлювати тільки вентиляційні решітки.

Нормальною тягою димоходу вважається мінімальне розрідження в димоході, встановлене державними стандартами на прилади і апарати, які підключені до димоходу, але не менше 2 Па. Перевірка і очищення димових і вентиляційних каналів комунально-побутових об'єктів, житлових та громадських будинків оформляються актом. Димові і вентиляційні канали на горищах

будинків, а при суміщеній покрівлі - на оголовках, повинні бути побілені і пронумеровані фарбою відповідно до номерів квартир. Після кожного ремонту димоходи підлягають позачерговій перевірці і прочищенню. Вказані роботи проводить спеціалізована організація.

Запровадження на ринку природного газу України розрахунку за спожитий чи переданий газ в енергетичних одиницях дає змогу більш точно визначати навантаження на газові мережі, підбирати діаметр труб та обладнання і проводити розрахунки за реально надані послуги. При виконанні гідравлічних розрахунків рекомендується визначати потрібні діаметри газопроводів використовуючи значення вищої теплоти згорання газу.

Висновки. Стабільність газопостачання в

умовах воєнного стану залежить від оперативності та кваліфікації працівників, що обслуговують газові мережі. Фактичні умови експлуатації можуть істотно відрізнятися від тих, що були прийняті під час розробки нормативних документів, які і зараз чинні.

Наразі є необхідність врахування наявних впливів і реалій в нормативах, оновлюючи та доповнюючи їх. Наприклад, потребує коригування існуюче обмеження проведення газонебезпечних роботи тільки у світлий час доби п. 7.13 [2]. Також необхідно вивчити вплив вибухової хвилі на стан підземних інженерних мереж, в тому числі газопроводів. Особливе актуальність має потреба детального вивчення та розробки рекомендацій по проведенню відновлювальних робіт на пошкоджених газопроводах.

References

1. DBN V.2.5-20-2018. Hazopostachannia / Minrehion Ukrainy. – K.: Minrehion Ukrainy, 2019. – 109 s.
2. NPAOP 0.00-1.76-15. Pravyla bezpeky system hazopostachannia. – K.: Osnova, 2015. – 179 s.
3. Stasiuk B. R. Udoshkonalennia metodiv diahnostuvannia vytokiv z hazovykh merezh. Dys. kand. tekhn. nauk. Ivano-Frankivskiy tekhnichnyi universytet nafty i hazu.- Ivano-Frankivsk, 2015- 144 s.
4. DBN V.2.5-41:2009 Inzhenerne obladnannia budynkiv i sporud. Zovnishni merezhi ta sporudy. Hazoprovody z polietylenovykh trub. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo. – K.: Minrehion Ukrainy, 2010. – 44 s.
5. Poriadok tekhnichnoho ohliadu, obstezhennia, otsinky ta pasportyzatsii tekhnichnoho stanu, zdiisnennia zapobizhnykh zakhodiv dlia bezavariinoho ekspluatuvannia system hazopostachannia, zatverdzhenyi Nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy vid 24.10.2011 № 640.
6. DBN V.2.2-15-2019 «Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia» / Ministerstvo rehionalnogo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. – K.: Minrehion Ukrainy, 2019. – 149 s.
7. DSTU-N B V.2.5-42:2010 Inzhenerne obladnannia budynkiv i sporud. Nastanova z proektuvannia, montazhu ta ekspluatatsii vnutrishnykh system hazopostachannia z vykorystanniam midnykh bezshovnykh kruhlykh trub.
8. Ekspluatatsiya sistem gazosnabzheniya. Operacionnye karty tehnologicheskikh processov / Pod red. G. G. Shishko – Simferopol, 2013. – 644s.
9. Tkachenko V. A., Skliarenko O. M. Hazopostachannia: pidruchnyk. – K.: IVNVKP «Ukrheliotekh», 2012. – 588 s.
10. Zbytky operatoriv HRM vid pochatku rosiiskoi ahresii // Informatsiine ahentstvo «INTERFAKS-Ukraina», 27.05.2022 r. <https://interfax.com.ua/news/economic/835348.html>.

UDC 696.2

Features of exploitation of engineering systems of buildings during martial law

Yu. Franchuk¹, V. Konovaliuk²,

¹PhD, assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, franchuk.yy@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7910-8705

²PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, konovaliuk.va@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5115-7188

Abstract. The destruction of engineering systems of buildings and structures, periodic peak loads in the mode of their work, which are formed during hostilities, significantly affect the stability of the operation of these systems. The need to perform repair and debugging work in the emergency mode is not always consistent with the current labor protection requirements, which were developed for the conditions of operation of engineering networks in peacetime. Given the existing and delayed impact of damage to the operation of engineering systems, it is necessary to take into account the existing conditions in the normative documents, which can be used in the future in major circumstances. Explosions near gas pipelines generate dynamic vibrations similar to pile driving during construction. In this case, the "Safety Rules for Gas Supply Systems" require inspection of welded joints along the entire length of the damage plus 20m. Often, damage to a gas pipeline caused by an explosion leads to its displacement vertically and horizontally. Therefore, it becomes necessary to check the welded joints closest to the place of damage by a physical control method. If a defect is detected in the joints, it is necessary to check the next joint of the gas

pipeline. In addition to through damage, there is a possibility of damage to only the insulating layer. Since it is physically impossible to check an underground gas pipeline, it is necessary to use an instrumental method to detect such damage. Not eliminated insulation damage will lead to intensive corrosion of the steel gas pipeline, and subsequently to the gas leakage. Therefore, it is necessary to conduct an extraordinary instrumental examination, on the basis of which areas that need additional isolation are determined. An inspection and additional sealing of engineering inputs and outputs of underground utilities should be carried out. The buildings should be monitored for the presence of micro-concentrations of carbon monoxide and control of pre-explosion concentrations of methane.

Keywords: gas supply, smoke removal, gas hazardous work, comprehensive instrumental examination, gas pipeline repair.

Надійшла до редакції / Received 04.01.2023

UDC 697:699.86

Energy Efficiency Issues in Buildings: Analysis of World Practice

A. Gasimov¹, N. Mammadov², S. Akbarova³, G. Feyziyeva⁴

¹ PhD., Professor. Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan, akif.qasimov@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0289-1180

² PhD, Associate Professor. Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan, nurmammadov@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0508-0439

³ PhD, Associate Professor. Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan, samira.akbarova@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0916-7734

⁴ PhD, Associate Professor. Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan, gulnar.feyziyeva@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0289-1180

Abstract. At present, the volume of world energy consumption is continuously and rapidly increasing, which is a consequence of the industrialization process, population growth, increase in energy costs for the extraction of natural resources, etc. Therefore, the importance of solving the problem of energy efficiency is of paramount importance for modern civilization. In this work, there is an analysis of international experience of energy efficient construction. The main directions of energy-efficient development are highlighted. It's shown that the classical method of heat loss calculations wrongly takes into account the wind effect. The more correct one is required. At the same time, it is worth applying linguistic variables and fuzzy logic, which adequately describe states that are described by verbal statements, and not by numerical values. In conclusion, the most emerging tasks for our Republic are selected: optimal placement of the building on the general plan of the city, incl. maintaining the distance between buildings under the construction and urban-planning regulations; proper heat insulation of the building envelope by the orientation of facades and depending on the climatic parameters of the outside air; air-tightening of building avoiding in- and exfiltration; maximum possible automation of engineering systems up to integration from smart house to smart city level; modernization and optimization of the operation of engineering systems; maximum use of renewable and secondary (such as exhaust air) energy sources; rejection of the classical calculation method of heat loss estimation, which takes into account the effect of wind speed, and to develop a new methodology.

Keywords: energy efficiency, building envelope, heating, ventilation, air-conditioning, energy demand.

Introduction. Today, in almost all countries of the world, including our republic, the problem of saving thermal energy in the construction industry has led to the emergence of various energy-efficiency programs and technologies. In the development and implementation of two such programs "Energy Saving in Buildings and Social Systems" and "Solar Heat and Cooling", the leading role belongs to the International Energy Agency (IEA). In 1995, the IEA disseminated the best practices in the design, construction and monitoring of buildings with low thermal energy consumption in 13 countries. That activity was established under the Target XIII sub-program [1]. The average design value of thermal energy consumption in these buildings is below 50 kWh/m², which is less than 1/3 of the average thermal energy consumption of traditional buildings. Figure 1 shows the annual consumption of thermal energy of the buildings of the subprogram "Task XIII".

These projects are pilot ones, and the technologies, and indicators proposed by them for the thermal energy consumption should be guidelines for the subsequent development of new building codes and programs for the thermal protection of external enclosing structures and the design of engineering systems, as well as for the

construction of new buildings and the reconstruction of old ones.

Based on the above-mentioned pilot projects for our republic, it is necessary to create a unified design methodology for the thermal protection of building envelopes and modernization of engineering systems, to consider the possibility of using mechanical ventilation instead of natural ventilation for modern multi-story residential buildings with external enclosing structures with increased thermal efficiency. The methodology will be valid in the building codes and regulations of many European countries.

Relevance of research. At present, the volume of world energy consumption is continuously and rapidly increasing, which is a consequence of the industrialization process, population growth, increase in energy costs for the extraction of natural resources, etc., as a result, available oil and gas reserves around the world are rapidly depleting. The predicted reserves of oil and gas in the world are small, and the growth of their direct combustion in the future will be limited due to the pollution of the natural environment by emissions of gases and ash during their combustion. Therefore, the importance of solving the problem of energy conservation is of paramount importance for modern civilization

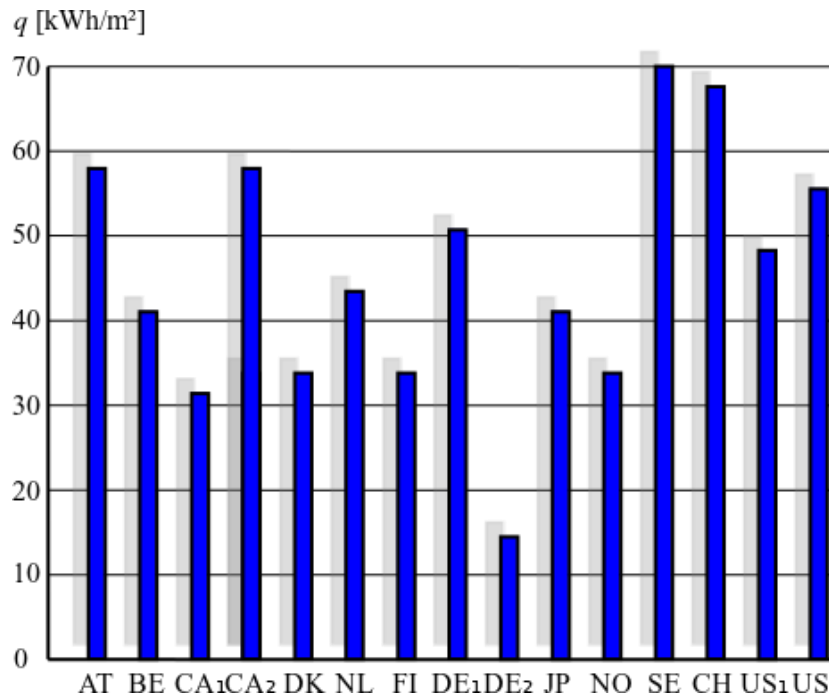


Figure 1. Annual heat energy consumption of buildings, built under the subprogram "Task XIII", kWh/m²: AT – Austria; BE – Belgium; CA1 – Canada-1; CA2 – Canada-2; DK – Denmark; NL – Netherland; FI – Finland; DE1 – Germany-1; DE2 – Germany-2; JP – Japan; SE – Sweden; CH – Switzerland; US1 – the United States of America-1; US2 – the United States of America-2

Recent studies and publications. The study and generalization of foreign experience in the field of energy efficiency in the construction industry show that the reduction of energy consumption for engineering systems of buildings for various purposes [2-14] is considered by the governments of many countries as the most important national economic issue and new legislative and regulatory documents, long-term programs are being developed, research and design projects are being carried out. work, programs of full or partial transition to renewable energy sources in the construction industry are being discussed.

When designing residential and administrative buildings, urban planners, architects, and energy and communication systems engineers should work together as a team, and the following main measures should be taken as energy-saving measures:

- the choice of the shape, size, and orientation [15-19] of the building and its rooms;
- the distance between buildings [20];
- the combination and placement of the building on the general urban plan [20];
- optimizing the wind effect on the buildings [20];
- increasing the overall thermal resistance to heat transfer of building envelopment [21-22] including heat insulation [13, 22-28], reducing the area and using energy-efficient glazing [28-30], decreasing thermal bridges [31] etc.;

- air-tightening of buildings to avoid uncontrolled air exchange and give full control to ventilation and air-conditioning systems [32-33]
- increasing the thermal capacity of opaque envelopment parts incl. using phase change materials to raise the thermal stability to outdoor temperature oscillations [34-35];
- optimising solar radiation gains [36-38];
- use of ventilated windows to reduce heat gain from solar radiation in summer and reduce heat loss in winter [39];
- using renewable energy [40-45] incl. absorption of solar radiation by the envelope and special indoor elements for heating [46];
- using green structures that connect building structures with living plants to increase the thermal resistance of the envelope, perform passive air-conditioning and control solar radiation gains and solar heating of the envelope [47-61];
- increasing the efficiency of engineering systems, inter alia:
 - correct selection of heating system type [62], heat transfer method [63-66], heat carrier temperature [66-67], proper balancing of all hydronic systems [68] etc.;
 - more efficient air distribution in ventilation and air conditioning [69-72];
 - energy-efficient air handling/make-up [73-77];

- proper automation of engineering systems up to centralised control of all of them at the level from the smart house to the smart city [68, 78-80].

In world design practice [60,61,81-87], two methods are used to determine the energy demands on heating, ventilation, and air conditioning systems. The first method is the calculation of stationary external and internal climatic parameters or stationary internal and unsteady external ones without simulation of the inertia. This method is approximate, which makes it quite easy to perform multivariate calculations and, as a rule, gives overestimated (sometimes underestimated) results for thermal loads. The second method is the calculation of non-stationary internal and external climatic parameters, taking into account the thermal engineering and heat storage characteristics of the external enclosing structures, usually using special software [81-87].

Purposes of the article. Based on the literature analysis, it's necessary to highlight the main tasks and directions to raise the energy efficiency in our Republic, which can be used for many other countries.

Main part. Our studies have shown that conventional methods for analysing and modelling the operation of heating, ventilation and air conditioning systems according to a special program and based on accurate processing of numerical data are essentially unable to cover the enormous complexity of real processes because it is practically impossible to take into account all the factors and parameters that affect the consumption of thermal energy. This corresponds to significant deviations between different building energy simulation software [82]. This circumstance leads to the fact that to obtain a real picture of the operation of indoor microclimate systems, it is necessary to abandon the traditional requirements for measurement accuracy, which were necessary for the mathematical analysis of well-defined heat consumption curves.

One of the problems in calculating heat losses is taking into account the wind effect. The "classical" method [88] requires using the indoor heat transfer coefficient $8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for internal wall surfaces (the air is close to still at the significant distance) and $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for external ones (what average wind speed was accepted?). Most methods of post-soviet countries inherited the classical one. Is it suitable for each region – the question should be investigated. The second problem is correction factors β for winds. Nowadays, they are dependent on wind speed and repetitiveness at the facade orientation. But in urban areas, the wind changes

speed and direction according to the alignment of buildings, which can be easily observed by difficult to calculate. Future development can fully change wind movement. The Building Norms provide design wind speed at a height of 10 meters from ground level. It's not acceptable for either modern high-rise buildings or one-two stories individual residential houses. Thus, the corrections β are wrong and cause invalid results. To correctly calculate and estimate heat losses, we need a new method corresponding to the regional climate peculiarities and wind protection of buildings.

It is assumed that to regulate the consumption of thermal energy and control the entire climate system, it is advisable to use the concept of a linguistic variable, introduced by L. Zadeh [89-91]. Such linguistic variables make it possible to more accurately determine and adequately reflect the approximate verbal description of these systems in the case when there is no exact mathematical deterministic description. At the same time, it should be taken into account that, according to the same author, many fuzzy modes described linguistically are often no less informative than an exact description.

Organized air exchange, heat recovery and recirculation in microclimate systems are the main factors to energy-efficiently ensure clean air and human comfort in the premises. The quality and reliability of the operation of these systems determine the living or working comfortable conditions for occupants, the safety and durability of the building envelope, ensuring social ecology and reducing the consumption of thermal energy. With the development of scientific and technological progress, a person has more and more opportunities to increase the level of comfort and safety in buildings. The advent of information technology has opened up vast horizons for this direction in the construction industry.

Now in modern construction, it is possible to automate all life support processes associated with microclimate systems. Automation and control of the operation of building engineering systems make it possible to significantly save thermal energy provided for engineering and communication systems. This is due to the optimization and synchronization of the operation of all these systems separately and their more efficient joint work. For example, synchronization of the operation of heating, ventilation and air conditioning systems can significantly reduce the consumption of thermal energy to maintain optimal indoor air parameters regardless of external climatic changes, increase the period of uninterrupted operation of engineering systems, and reduce the cost of maintenance and

operation of equipment [92].

The task of microclimate systems is mainly that in the room for each person, taking into account his individual needs, it is necessary to create comfortable parameters of indoor air. In addition, when designing these systems, it is necessary to provide that, if necessary, the neutralization of permanent external climatic disturbances will be required.

One of the widely used measures to waste a large amount of heat energy is natural ventilation. Such systems are often present in new construction despite the results of calculations [93]. To achieve 4 % of efficiency (less than the last steam locomotives), it's necessary to build a 1 km skyscraper. The modernisation of such a system replacing exhaust grills with fans stabilises it but additionally squanders electricity. For newly built multi-story residential buildings, it is necessary to design mechanical supply and exhaust ventilation with heat recovery and individual control following the needs of each person. In many European countries (Norway, Germany, Finland, etc.), in new construction, it is mandatory to design mechanical exhaust ventilation with heat recovery from the exhaust air for heating or cooling the supply air. As an alternative, it's possible to modernise natural ventilation by installing a fan and a heat pump [94] at the top of the duct to redirect the heat energy for other purposes, for example, hot water and heating.

The design of a mechanical ventilation system and at the same time a combination of supply and exhaust mechanical systems with natural ventilation requires comparative calculations. It is necessary to improve the quality of the ventilation system and, accordingly, the internal air, to reduce the frequency of air exchange in residential premises to reduce the consumption of thermal energy.

The above requirements apply to all types of newly built or reconstructed residential and public buildings. It is known that internal heat generation in residential buildings usually does not exceed 10 W/m². At the same time, our studies show that artificial cooling is practically not required for the climate of some regions of the Republic of Azerbaijan [95].

Numerical calculations show that with an average annual specific heat load on a heating system from 10 to 15 kW·h/m², the difference in the total cost of heat energy for building heating systems without thermal protection and with thermal protection is minimal (the results of the studies refer only to newly built residential buildings).

Over the past decades, due to the changing requirements of investors, the increased needs of

potential customers, as well as the relevance of energy-saving issues, the rising cost of thermal energy and the increasing costs required for the operation of buildings, as well as heating, ventilation and air conditioning systems used in modern multifunctional public and residential buildings have been significantly modified. The current state of the environment, indoor air quality and the growing need to create intelligent buildings have influenced the modernization and application of modern information technologies in microclimate systems.

In modern multifunctional buildings, the climatic parameters of the indoor air of certain rooms can be different, which is associated with the individual needs of people, production technology, etc. Therefore, the heat loads on the air-conditioning systems in individual rooms may not coincide either in time or in magnitude.

When designing ventilation and air conditioning systems, it is necessary to be guided by the fact that for the choice of technical solutions, the main criterion should be to ensure an environmentally friendly air regime within economically feasible limits with minimum consumption of thermal energy.

It is known that the growth of the population, respectively, will cause an increase in the consumption of thermal energy throughout the world, the consequence of which is an increase in harmful emissions into the atmosphere, since, until 2040, fossil fuels will be used up to 77 % according to US Energy Information Administration [96]. The pace of transition to alternative renewable energy sources is not very high.

It is known that a significant share of the produced thermal energy is spent on the needs of engineering systems of buildings and structures. According to our calculations, this share is about 50 % of all energy produced. The result corresponds to the European Union data [97]. This share must be reduced not by reducing the living standard of the people in these buildings, but, on the contrary, by increasing the comfort level not by increasing, but by rising the efficiency of thermal energy consumption.

Conclusions. Summarizing the above, it can conclude that to improve the energy efficiency of modern buildings, it is necessary to perform the following priority tasks:

- optimal placement of the building on the general plan of the city, incl. maintaining the distance between buildings under the construction and urban-planning regulations;
- proper heat insulation of the building envelope by the orientation of facades and

- depending on the climatic parameters of the outside air;
- air-tightening of building avoiding in- and exfiltration;
- maximum possible automation of engineering systems up to integration from smart house to smart city level;
- modernization and optimization of the operation of engineering systems;
- maximum use of renewable and secondary (such as exhaust air) energy sources;
- rejection of the classical calculation method of heat loss estimation, which takes into account the effect of wind speed, and to develop a new methodology.

References

1. Hastings R. *Solar Low Energy Houses of IEA Task 13*. Routledge, 2017.
2. Zago M, et al. 'Efficiency Analysis of Independent and Centralized Heating Systems for Residential Buildings in Northern Italy'. *Energies*, vol. 4, no. 11, 2011, pp. 2115–2131, <https://doi.org/10.3390/en4112115>.
3. Piana E, et al. 'A Standard-Based Method to Simulate the Behavior of Thermal Solar Systems with a Stratified Storage Tank'. *Energies*, vol. 13, no. 1, 2020, p. 266, <https://doi.org/10.3390/en13010266>.
4. Hamburg A, et al. 'Heat Loss Due to Domestic Hot Water Pipes'. *Energies*, vol. 14, no. 20, 2021, p. 6446, <https://doi.org/10.3390/en14206446>.
5. Patrčević F, et al. 'A Novel Dynamic Approach to Cost-Optimal Energy Performance Calculations of a Solar Hot Water System in an NZEB Multi-Apartment Building'. *Energies*, vol. 15, no. 2, 2022, p. 509, <https://doi.org/10.3390/en15020509>.
6. Magri M, et al. 'Implementation of an AI Ready BACS System in Treviso School with DCV (Demand Control Ventilation)'. *E3S Web of Conferences*, vol. 343, 2022, p. 02003, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234302003>.
7. Ożadowicz A. 'A Hybrid Approach in Design of Building Energy Management System with Smart Readiness Indicator and Building as a Service Concept'. *Energies*, vol. 15, no. 4, 2022, p. 1432, <https://doi.org/10.3390/en15041432>.
8. Felius L. et al. 'Upgrading the Smartness of Retrofitting Packages towards Energy-Efficient Residential Buildings in Cold Climate Countries: Two Case Studies'. *Buildings*, vol. 10, no. 11, 2020, p. 200, <https://doi.org/10.3390/buildings10110200>.
9. Mancini F. et al. 'Energy Use in Residential Buildings: Impact of Building Automation Control Systems on Energy Performance and Flexibility'. *Energies*, vol. 12, no. 15, 2019, p. 2896, <https://doi.org/10.3390/en12152896>.
10. Ożadowicz A. 'A new concept of active demand side management for energy efficient prosumer microgrids with Smart Building Technologies'. *Energies*, vol. 10, no. 11, 2017, p. 200, <https://doi.org/10.3390/en1011177>.
11. Lu, Yi et al. 'A Systematic Literature Review of Non-Compliance with Low-Carbon Building Regulations'. *Energies*, vol. 15, no. 24, 2022, p. 9266, <https://doi.org/10.3390/en15249266>.
12. Lizana J. et al. 'Overcoming the Incumbency and Barriers to Sustainable Cooling'. *Buildings & Cities*, vol. 3, no. 1, 2022, pp. 1075–1097, <https://doi.org/10.5334/bc.255>.
13. Sadowski K. 'Comparison of the Carbon Payback Period (CPP) of Different Variants of Insulation Materials and Existing External Walls in Selected European Countries'. *Energies*, vol. 16, no. 1, 2022, p. 113, <https://doi.org/10.3390/en16010113>.
14. Buonomano A., et al. 'Advanced Energy Technologies, Methods, and Policies to Support the Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems'. *Energy Reports*, vol. 8, 2022, pp. 4844–4853, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.171>.
15. Storcz T. et al. 'Energy Design Synthesis: Algorithmic Generation of Building Shape Configurations'. *Energies*, vol. 16, no. 5, 2023, p. 2254, <https://doi.org/10.3390/en16052254>.
16. Ji Yunzhu et al. 'Intelligent Parametric Optimization of Building Atrium Design: A Case Study for a Sustainable and Comfortable Environment'. *Sustainability*, vol. 15, no. 5, 2023, p. 4362, <https://doi.org/10.3390/su15054362>.
17. Hajtmanek R., et al. 'Determination of Solar-Surface-Area-to-Volume Ratio: Early Design Stage Solar Performance Assessment of Buildings'. *Buildings*, vol. 13, no. 2, 2023, p. 296, <https://doi.org/10.3390/buildings13020296>.
18. Notodipuro P. G. A. S. K. W., Ariani M. 'The Effect of Building Shape and Orientation on Energy Use at Sloped Sites in Tropical Climates Using Sefaira'. *ARTEKS Jurnal Teknik Arsitektur*, vol. 7, no. 1, 2022, pp. 131–142, <https://doi.org/10.30822/arteks.v7i1.1397>.
19. Kistelegdi I. et al. 'Building Geometry as a Variable in Energy, Comfort, and Environmental Design Optimization—A Review from the Perspective of Architects'. *Buildings*, vol. 12, no. 1, 2022, p. 69, <https://doi.org/10.3390/buildings12010069>.
20. Li Zhaoji et al. 'Impacts of Building Microenvironment on Energy Consumption in Office Buildings: Empirical Evidence from the Government Office Buildings in Guangdong Province, China'. *Buildings*, vol. 13, no. 2, 2023, p. 481, <https://doi.org/10.3390/buildings13020481>.
21. Jiménez Mejía, Katia, et al. 'Evaluation of the Impact of the Envelope System on Thermal Energy Demand in Hospital Buildings'. *Buildings*, vol. 10, no. 12, 2020, p. 250, <https://doi.org/10.3390/buildings10120250>.
22. Pérez-Carramiñana C., et al. 'Optimization of Architectural Thermal Envelope Parameters in Modern Single-Family House Typologies in Southeastern Spain to Improve Energy Efficiency in a Dry Mediterranean Climate'.

Sustainability, vol. 14, no. 7, 2022, p. 3910, <https://doi.org/10.3390/su14073910>.

23. Al-Abduljabbar A., et al. 'Insulation Performance of Building Components and Effect on the Cooling Load of Homes in Saudi Arabia'. Sustainability, vol. 15, no. 7, 2023, p. 5685, <https://doi.org/10.3390/su15075685>.

24. Alsuhaibani A. M., et al. 'Green Buildings Model: Impact of Rigid Polyurethane Foam on Indoor Environment and Sustainable Development in Energy Sector'. Heliyon, vol. 9, no. 3, 2023, p. e14451, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14451>.

25. Kumar D., Morshed A., Abhijeet J. D. 'Investigating the Influence of Thermal Conductivity and Thermal Storage of Lightweight Concrete Panels on the Energy and Thermal Comfort in Residential Buildings'. Buildings, vol. 13, no. 3, 2023, p. 720, <https://doi.org/10.3390/buildings13030720>.

26. Zach J. et al. 'The Use of Advanced Environmentally Friendly Systems in the Insulation and Reconstruction of Buildings'. Buildings, vol. 13, no. 2, 2023, p. 404, <https://doi.org/10.3390/buildings13020404>.

27. Zhangabay, N. et al. 'Analysis of the Influence of Thermal Insulation Material on the Thermal Resistance of New Facade Structures with Horizontal Air Channels'. Case Studies in Construction Materials, vol. 18, no. e02026, 2023, p. e02026, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02026>.

28. Araújo, J. et al. 'Assessment of Different Envelope Configurations via Optimization Analysis and Thermal Performance Indicators: A Case Study in a Tropical Climate'. Sustainability, vol. 14, no. 4, 2022, p. 2013, <https://doi.org/10.3390/su14042013>.

29. Kragt, S. et al. 'The Potential of Static and Thermochromic Window Films for Energy Efficient Building Renovations'. Journal of Facade Design and Engineering, vol. 10, no. 2, 2022, pp. 87–104, <https://doi.org/10.47982/jfde.2022.powerskin.6>.

30. Mehdizadeh-Rad, H. et al. 'An Energy Performance Evaluation of Commercially Available Window Glazing in Darwin's Tropical Climate'. Sustainability, vol. 14, no. 4, 2022, p. 2394, <https://doi.org/10.3390/su14042394>.

31. Milovanović B. et al. 'Energy Renovation of the Multi-Residential Historic Building after the Zagreb Earthquake – Case Study'. Case Studies in Thermal Engineering, vol. 38, no. 102300, 2022, p. 102300, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102300>.

32. Mahmoud S. et al. 'The glass facades of the future architecture and the ways of its tightness'. Journal of Architecture, Art & Humanistic Science, vol. 6, no. 25, 2019, pp. 18–31, <https://doi.org/10.21608/mjaf.2019.13647.1202>.

33. Tombarević E., et al. 'The Impact of Windows Replacement on Airtightness and Energy Consumption of a Single Apartment in a Multi-Family Residential Building in Montenegro: A Case Study'. Energies, vol. 16, no. 5, 2023, p. 2208, <https://doi.org/10.3390/en16052208>.

34. Kumar D., Morshed A., Jay S., et al. 'Comparative Analysis of Form-Stable Phase Change Material Integrated Concrete Panels for Building Envelopes'. Case Studies in Construction Materials, vol. 18, no. e01737, 2023, p. e01737, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01737>.

35. Zhu Hongzhi et al. 'Preparation, Encapsulation, and Performance Evaluation of Ternary Phase Change Materials for Building Envelope'. Advances in Civil Engineering, vol. 2022, 2022, p. 8246365, <https://doi.org/10.1155/2022/8246365>.

36. Muñoz-Viveros C., et al. 'Influence of the Type of Solar Protection on Thermal and Light Performance in Classrooms'. Energy Reports, vol. 8, 2022, pp. 5329–5340, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.007>.

37. Qahtan A. M., Almagani A. H. 'Experimental Evaluation of Thermal and Lighting Performance Using Double Dynamic Insulated Glazing'. Buildings, vol. 12, no. 8, 2022, p. 1249, <https://doi.org/10.3390/buildings12081249>.

38. Bizoňová S. et al. 'Methods of Preliminary Estimation of Total Solar Energy Transmittance (TSET) on a Sun Protected Window with Climatic Chamber and Hot Box Apparatus'. Civil and Environmental Engineering, vol. 18, no. 1, 2022, pp. 269–279, <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0025>.

39. 'The Intelligent Ventilated Window by HORN GROUP'. Archello, <https://archello.com/brand/the-intelligent-ventilated-window-by-horn-group>. Accessed 22 Apr. 2023.

40. Sanjiv K., et al. 'Energy Performance Assessment of Sea Water Air Conditioning (SWAC) as a Solution toward Net Zero Carbon Emissions: A Case Study in French Polynesia'. Energy Reports, vol. 9, 2023, pp. 437–446, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.201>.

41. Shen Chao et al. 'Operation Strategy and Energy-Saving of the Solar Lighting/Heating System through Spectral Splitting'. Energy and Built Environment, vol. 4, no. 3, 2023, pp. 270–280, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.01.002>.

42. Al Imam M. F. I. et al. 'Effect of Novel Phase Change Material (PCM) Encapsulated Design on Thermal Performance of Solar Collector'. Results in Materials, vol. 18, no. 100388, 2023, p. 100388, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100388>.

43. Dhaundiyal A. et al. 'Thermal Analysis of the Hybrid HVAC Unit Using Interpolant Function'. Energy Reports, vol. 9, 2023, pp. 3943–3955, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.091>.

44. Alharthi M. A., et al. 'Investigation of New Combined Cooling, Heating and Power System Based on Solar Thermal Power and Single-Double-Effect Refrigeration Cycle'. Energy Reports, vol. 9, 2023, pp. 289–309, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.002>.

45. Buday T., Buday-Bódi E. 'Reduction in CO₂ Emissions with Bivalent Heat Pump Systems'. Energies, vol. 16, no. 7, 2023, p. 3209, <https://doi.org/10.3390/en16073209>.

46. De Gracia A., et al. 'Solar Absorption in a Ventilated Facade with PCM. Experimental Results'. Energy Procedia,

vol. 30, 2012, pp. 986–994, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.111>.

47. Squier M., Davidson C. I. ‘Heat Flux and Seasonal Thermal Performance of an Extensive Green Roof’. *Building and Environment*, vol. 107, 2016, pp. 235–244, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.025>.

48. Tam V. W. Y., et al. ‘Thermal Insulation and Cost Effectiveness of Green-Roof Systems: An Empirical Study in Hong Kong’. *Building and Environment*, vol. 110, 2016, pp. 46–54, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.032>.

49. Chen P.-Y. et al. “Toward the Practicability of a Heat Transfer Model for Green Roofs.” *Ecological Engineering*, vol. 74, 2015, pp. 266–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.114>.

50. Moody S. S., David J. S. “Development and Application of a Building Energy Performance Metric for Green Roof Systems.” *Energy and Buildings*, vol. 60, 2013, pp. 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.002>.

51. Berardi U. “Field Studies of the "Cooling Effect" of Vertical Greening of Buildings” *Ventylatsiia, osvittlenia ta teplohozopostachannia*, vol. 25, 2018, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>.

52. Tkachenko T. “Field Studies of the "Cooling Effect" of Vertical Greening of Buildings.” *Ventylatsiia, osvittlenia ta teplohozopostachannia*, vol. 25, 2018, pp. 44–49. <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/168187>.

53. Tkachenko T., Mileikovskiy V. “Assessment of Light Transmission for Comfort and Energy Efficient Insolation by ‘Green Structures.’” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, pp. 139–151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63403-2_13.

54. Tkachenko T., Mileikovskiy V. “Methodology of thermal resistance and cooling effect testing of green roofs” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 42, 2021, pp. 50–56. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2020.8>.

55. Tkachenko T., Mileikovskiy V. “Geometric Basis of the Use of “Green Constructions” for Sun Protection of Glazing” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 809, 2019, pp. 1096–1107. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63403-2_13

56. Tkachenko T., Mileikovskiy V. “Research of cooling effect of vegetation layer of green structures in construction” *International Scientific and Practical Conference “World science”*, vol. 7, 2017, pp. 22–24. https://www.academia.edu/38011397/RESEARCH_OF_COOLING_EFFECT_OF_VEGETATION_LAYER_OF_GREEN_STRUCTURES_IN_CONSTRUCTION

57. Tkachenko T., Mileikovskiy V. “Study of Heat Transfer in Energy Efficient Green Roofing”. *Ventylatsiia, osvittlenia ta teplohozopostachannia*, vol. 21, 2017, pp. 37–48. <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/168397>

58. Ploskyi V. et al. “Simulation of the thermal resistance of the grass layer of a green roof”. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, Series Theory and Building Practice*, vol. 844, 2016, pp. 158–163. <https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-844-2016/modelyuvannya-termichnogo-oporu-travyanogo-sharu>

59. Tkachenko T. et al. “Energy efficiency of green technologies in modern urbocenoses” *Energy Efficiency in Construction and Architecture*, vol. 8, 2016, pp. 387–392. http://nbuv.gov.ua/UJRN/enef_2016_8_64

60. Tkachenko T., et al. “Assessment of Energy Savings and Indirect Reduction of CO₂ Emissions by Vertical Gardening.” *Ventylatsiia, osvittlenia ta teplohozopostachannia*, vol. 31, 2019, pp. 16–23. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.31.16-23>.

61. Tkachenko T. “Energy Efficiency of ‘Green Structures’ in Cooling Period.” *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3.2, 2018, p. 453. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14570>.

62. Liu Li et al. “Research on Predictive Control of Energy Saving for Central Heating Based on Echo State Network.” *Energy Reports*, vol. 9, 2023, pp. 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.065>.

63. Wu Jie et al. “Research on the Cross-contamination in the Confined Conference Room With the Radiant Floor Heating System Integrated With the Down-supply Ventilation.” *Heliyon*, vol. 9, no. 3, 2023, p. e14389. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14389>.

64. Kim S. E. et al. “Mock-up Test on the Application of Phase Change Materials in Underfloor Radiant Heating System in Apartments.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2023, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2185483>.

65. Zhelykh V. et al. “Study of the Thermal Mode of a Barn for Piglets and a Sow, Created by Combined Heating System.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 8 (89), 2017, pp. 45–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112117>.

66. Hasan A. et al. “A Combined Low Temperature Water Heating System Consisting of Radiators and Floor Heating.” *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 5, 2009, pp. 470–79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.016>.

67. Buker, Mahmut Sami, and Saffa B. Riffat. “Solar Assisted Heat Pump Systems for Low Temperature Water Heating Applications: A Systematic Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, 2016, pp. 399–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.157>.

68. Pyrkov V. “Gidravlicheskoie Regulirovaniie Sistem Otopleniia i Okhlazhdeniia. Teoriia i Praktika”. 2nd ed., Taki Spravy, 2010. <https://devi.rv.ua/data/files/books/e5866548e814aea802aedc9fbbbad533.pdf>

69. Korbust V., et al. “Examining a Device for Air Distribution by the Interaction of Counter Non-coaxial Jets Under Alternating Mode.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 8 (86), 2017, pp. 30–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96774>.

70. Vozniak O. T. et al. “Research of Device for Air Distribution With Swirl and Spread Air Jets at Variable Mode.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 7(78), 2015, p. 15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.96774>.

4061.2015.56235.

71. Korbut V., Mileikovskiy V. "Air Distribution in Convex Wall Jets for Ventilation With a Constant Air Flow." *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplofazopostachannia*, vol. 36, 2021, pp. 37–50. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.37-50>.

72. Korbut V., et al. "The Use of the Interaction of Convex Wall Jets for Ventilation With Variable Air Flow." *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplofazopostachannia*, vol. 37, 2021, pp. 7–12. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.7-12>.

73. Zadoiannyi O., Evdokimenko Y. "Experimental Studies of Air Dehumidification Using Synthetic Semipermeable Membranes in Air Conditioning Systems." *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplofazopostachannia*, vol. 24, 2018, pp. 24–31. <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/168258>

74. Zadoiannyi O., Evdokimenko Y. "Exergy Flow Diagram of Moist Air For Air Conditioning Systems." *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplofazopostachannia*, vol. 18, 2015, pp. 3–15. <https://repository.knuba.edu.ua/items/7049ec04-b6b5-40f3-a671-5a60bbbb2153>

75. Johansson D. et al. "Modelling an Air Handling Unit, Building and Occupant Variation Regarding Energy, Moisture and Frost Protection Based on Measurements of an Air Handling Unit and Occupants' Moisture Supply." *SN Applied Sciences*, vol. 5, no. 3, 2023, p. 74. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05291-1>.

76. Hong G., and Byungseon K. "Development of a Data-Driven Predictive Model of Supply Air Temperature in an Air-Handling Unit for Conserving Energy." *Energies*, vol. 11, no. 2, 2018, p. 407. <https://doi.org/10.3390/en11020407>.

77. Elsheniti M. B. et al. "Thermo-Economic Study on the Use of Desiccant-Packed Aluminum-Foam Heat Exchangers in a New Air-Handling Unit for High Moisture-Removal." *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 33, 2022, p. 101967. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101967>.

78. Ainuddin A. N. M. et al. "Smart Automatic Cooling System With Reduced Humidity Effect for Pet House During Covid 19 Crisis." *ASM Science Journal*, vol. 17, 2022, 864. <https://doi.org/10.32802/asmscj.2022.864>.

79. Dabbagh M., Moncef K. "Optimal Control Strategies for Switchable Transparent Insulation Systems Applied to Smart Windows for US Residential Buildings." *Energies*, vol. 14, no. 10, 2021, p. 2917. <https://doi.org/10.3390/en14102917>.

80. Fink J, van Leeuwen R. "Earliest Deadline Control of a Group of Heat Pumps With a Single Energy Source." *Energies*, vol. 9, no. 7, 2016, p. 552. <https://doi.org/10.3390/en9070552>.

81. Chen Yongbao, et al. "Machine Learning Approach to Predict Building Thermal Load Considering Feature Variable Dimensions: An Office Building Case Study." *Buildings*, vol. 13, no. 2, 2023, p. 312. <https://doi.org/10.3390/buildings13020312>.

82. Magni M. et al. "Detailed Cross Comparison of Building Energy Simulation Tools Results Using a Reference Office Building as a Case Study." *Energy and Buildings*, vol. 250, 2021, p. 111260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111260>.

83. Vallati A. et al. "Retrofit Proposals for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Historic Public Buildings: The Case of the Engineering Faculty's Seat of Sapienza University." *Energies*, vol. 16, no. 1, 2022, p. 151. <https://doi.org/10.3390/en16010151>.

84. Barone G. et al. "Assessing Energy Demands of Building Stock in Railway Infrastructures: A Novel Approach Based on Bottom-up Modelling and Dynamic Simulation." *Energy Reports*, vol. 8, 2022, pp. 7508–7522. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.253>.

85. Heracleous, C. et al. "A Methodology to Assess Energy-demand Savings and Cost-effectiveness of Adaptation Measures in Educational Buildings in the Warm Mediterranean Region." *Energy Reports*, vol. 8, 2022, pp. 5472–5486. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.140>.

86. Liu, Zu'an, et al. "Research on Energy-saving Factors Adaptability of Exterior Envelopes of University Teaching-office Buildings Under Different Climates (China) Based on Orthogonal Design and EnergyPlus." *Heliyon*, vol. 8, no. 8, 2022, p. e10056. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10056>.

87. Ibn-Elhaj S. et al. "Effect of Clay's Multilayer Composites Material on the Energy Efficiency of Buildings." *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 5, 2022, p. 151. <https://doi.org/10.3390/jcs6050151>.

88. Shchekin, R., et al. *Spravochnik Po Teplosnabzheniiu I Ventilatsii*. 4th ed., vol. 1. Heating and Heat Supply, Ukraine, Budivelnik. <https://teplota.org.ua/2009-01-03-schekin-korenevskii-spravochnik-po-teplosnabzheniyu-i-ventilyacii.html>

89. Zadeh L. A. "The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate reasoning—I." *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, 1975, pp. 199–249. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).

90. Zadeh L. A. "The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate reasoning—II." *Information Sciences*, vol. 8, no. 4, 1975, pp. 301–57. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90046-8).

91. Zadeh L. A. "The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate reasoning—III." *Information Sciences*, vol. 9, no. 1, 1975, pp. 43–80. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90017-1).

92. Mammadov N. Y.. "Ways to save thermal energy in intelligent buildings" *Nova Tema*, vol. 1, 2011.

93. Mileikovskiy V., Klymenko H. "Analytical Researches of the Energy Efficiency of Natural Ventilation" *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplofazopostachannia*, vol. 20, 2016, pp. 39–45. <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/168453>

94. Petrash V., et al. "Integration of Ground and Ventilation Air Energy for Heating Buildings." *Budownictwo O Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, vol. 10, no. 1/2021, 2021, pp. 7–17. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2021.1.01>.

95. Mammadov N.Y. "The use of modern information technologies in predicting the air flow for the premises of a building." *News of higher educational institutions and energy associations of the CIS "Energetika"*, vol. 3, 2008, pp. 72–77.

96. "Fossil Fuels Will Still Dominate Energy in 20 Years Despite Green Power Rising." World Economic Forum, www.weforum.org/agenda/2017/10/fossil-fuels-will-dominate-energy-in-2040.

97. "New Report: District Energy Can Decarbonize the EU Heating and Cooling Sector." District Energy Can Help Decarbonize EU. See How... | Danfoss, www.danfoss.com/en/about-danfoss/news/cf/new-report-district-energy-can-decarbonize-the-eu-heating-and-cooling-sector.

УДК 697:699.86

Проблеми енергоефективності в будівлях: аналіз світового досвіду

А. Ф. Гасімов¹, Н. Я. Мамедов², С. М. Акбарова³, Г. Г. Фейзієва⁴

¹ к.т.н., проф. Азербайджанський університет архітектури та будівництва, м. Баку, Азербайджан, akif.qasimov@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0289-1180

² к.т.н., доц. Азербайджанський університет архітектури та будівництва, м. Баку, Азербайджан, nurmammad.mammadov@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0508-0439

³ к.т.н., доц. Азербайджанський університет архітектури та будівництва, м. Баку, Азербайджан, samira.akbarova@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-0916-7734

⁴ к.т.н., доц. Азербайджанський університет архітектури та будівництва, м. Баку, Азербайджан, gulnar.feyziyeva@azmiu.edu.az, ORCID: 0000-0002-2665-9378

Анотація. На даний час обсяг світового енергоспоживання безперервно і стрімко зростає внаслідок процесу індустріалізації, зростання чисельності населення, підвищення енергетичних витрат на видобуток природних ресурсів тощо. Як наслідок, наявні запаси нафти та газу в усьому світі швидко виснажуються. Прогнозовані запаси нафти і газу у світі невеликі, і зростання їх прямого спалювання в майбутньому буде обмеженим через забруднення довкілля викидами газів і золи при їхньому спалюванні. Тому важливість вирішення проблеми енергоефективності має першочергове значення для сучасної цивілізації. У роботі проведено аналіз світового досвіду енергоефективного будівництва. Висвітлено основні напрямки енергоефективного розвитку. Показано, що класична методика розрахунку тепловтрат неправильно враховує дію вітру. Потрібна більш правильна методика виконання цього розрахунку. При цьому варто застосовувати лінгвістичні змінні та нечітку логіку, яка адекватно описує стани, які описуються вербальними висловлюваннями, а не числовими значеннями. На завершення виділено найбільш актуальні для нашої Республіки завдання: оптимальне розміщення забудови на генеральному плані міста, зокрема, дотримання відстані між будівлями за будівельними й містобудівними нормами; правильна теплоізоляція огорожувальних конструкцій за орієнтацією фасадів і залежно від кліматичних параметрів зовнішнього повітря; герметичність будівлі, що запобігає ін- та ексфільтрації; максимально можлива автоматизація інженерних систем до інтеграції від рівня розумного будинку до рівня розумного міста; модернізація та оптимізація роботи інженерних систем; максимальне використання відновлюваних і вторинних (наприклад, витяжного повітря) джерел енергії; відмова від класичного розрахункового методу оцінювання тепловтрат, що враховує вплив швидкості вітру, та розроблення нового методу.

Ключові слова: енергоефективність, огорожувальні конструкції, опалення, вентиляція, кондиціонування повітря, енергопотреба.

Надійшла до редакції / Received 05.01.2023

UDC 696.48

The selection of a methodology for calculating the heat load of hot water supply systems for facilities with significant uneven consumption

P. Glamazdin¹, N. Chepurna², B. Koziachyna³

¹associate professor KNUCA, Kyiv, Ukraine, sib.kiev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2611-2687

²PhD, associate professor KNUCA, Kyiv, Ukraine, chepumayanv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8044-7563

³post-graduate student KNUCA, Kyiv, Ukraine, bohthankoziachyna@gmail.com, ORCID: 0009-0000-6972-3862

Abstract. When determining the amount of thermal energy required for the functioning of the hot water supply system for any building, the question of choosing a heating method arises. It is especially relevant to accurately predict the capacity of the hot water supply system for facilities with pronounced uneven hot water consumption. In this research, a comparative analysis of methods for determining the maximum design flow rate of hot water was performed, which plays an important role in the selection of equipment for heating water in the flow mode. On the example of the main building of KNUCA, the problem of determining the total design hot water flow rate for buildings characterized by an uneven mode of water consumption is revealed. Monitoring of the actual mode of water consumption of the main building of KNUCA was carried out, as a result of which the real total hot water flow rate during the working day of the university was determined.

Keywords: hot water supply, heat load of the DHW system, simultaneous use of faucets, design hot water flow rate, uneven water consumption.

Introduction. A centralized hot water supply, as one of the components of general centralized heat supply systems, is experiencing a major crisis in Ukraine. The demand for this service from the population is significantly decreasing. Heat supply organizations are constantly looking for ways to stabilize the situation. Among these ways, two directions can be distinguished. The first direction includes the rejection of central heat supply station (CHSS) and, accordingly, four-pipe systems or the replacement of steel pipes of the hot water supply circuit with polyethylene ones where it is still difficult to refuse from CHSS and the comprehensive use of non-traditional and renewable heat sources, including solar systems and systems with heat pumps. The second direction is directly associated with the need to accumulate heat, which increases the cost of equipment. The solution to this problem lies in reducing the cost of equipment by optimizing its capacity and optimizing hot water consumption. In particular, this applies to some public buildings and especially to educational buildings, which forces us to turn to the study of this problem.

Relevance of research. In recent years, the volume of central heat supply services in Ukraine has been constantly decreasing [1]. At the same time, the decrease in the volume of hot water supply services in relation to centralized heating and ventilation is more intense [2]. This leads to the deregulation of existing central heat supply systems and, as a result, to energy overruns. Optimizing the consumption of hot water without changing the conditions of its consumption will help stabilize the above negative processes.

Recent studies and publications. The problem of improving the accuracy of predicting hot water consumption in heat supply facilities with sharp uneven water consumption has not been paid attention to in researches of recent years. Studies have been conducted in the areas of improving the reliability of hot water supply systems in large cities [3] and the use of solar energy to cover the needs of hot water supply [4], including buildings of higher education institutions [5, 6]. A detailed study of the current state of centralized hot water supply systems is presented in the monograph [7]. In this work, much attention is paid to forecasting the consumption of hot water, but by residential buildings, both apartment buildings and cottages. It is not possible to use the methods of calculation forecasting given in this paper for buildings with sharp fluctuations in hot water consumption.

In paper [3], the positive experience of deaeration of water for hot water supply was analyzed, which leads to a significant reduction in accidents in four-pipe heat supply systems and an extension of the service life of hot water supply pipes. The paper presents numerical indicators that show a decrease in the volume of centralized hot water consumption in the city of Zaporizhzhia in recent years.

Paper [4] is devoted to the use of high-temperature heat carriers in solar hot water systems. It is shown that the use of a heat carrier with a temperature of up to 300°C can solve the problem of stagnation of solar systems and extend the service life to 10 months in the latitudes of Ukraine, as well as significantly reduce the solar field area and the volume of the heat accumulator. However, in this paper, the

object of analysis is residential buildings.

Papers [8, 9, 10] are devoted to improving the efficiency of circuit solutions for solar hot water supply systems and do not highlight the problem of predicting the heat load, which affects the choice of equipment.

Paper [11] is devoted to the narrowly focused topic of using solar energy for hot water supply in individual housing construction. The article describes the choice of economic schemes of solar systems and the possibility of obtaining solar energy in different regions of Ukraine.

Paper [12] is devoted to determining the efficiency of solar hot water systems. In addition to an attempt to optimize the solar field area depending on the solar energy potential by region, the paper shows the positive impact of the introduction of solar hot water systems on reducing anthropogenic pressure on the environment.

Paper [6] analyzes the results of modeling the possible use of a solar system to provide hot water to a complex of university buildings in the city of Mykolaiv. To select the equipment in terms of predicting, the methodology for calculating water consumption in accordance with SNIP «Normy potrebleniya vody potrebitelyami», was adopted, which brings some inaccuracies due to vagueness in the formulation of some points of the regulatory document.

Paper [5] is devoted to modeling the operating modes and, to some extent, the choice of equipment for solar hot water supply systems at a university. In particular, the authors present an algorithm for modeling the operation of a solar system with an accumulator tank and the results of calculations. However, the initial data on the system load for modeling were taken without justification and even explanation.

Main part. When determining the amount of thermal energy required for the functioning of the hot water supply system for any building, the question of choosing a heating method arises. It is especially relevant to accurately predict the capacity of the hot water supply system for facilities with pronounced uneven hot water consumption. The largest consumption irregularities should be expected from educational buildings. For this reason, the KNUCA main building was taken for further analysis. Taking into account that there are no showers or bathrooms in the main building of the university, the only consumers of hot water are washbasins. The highest water consumption occurs during short periods of time (breaks) and very little or no water consumption after classes and on weekends. The approximate chart of water consumption during the university working day is shown in fig. 1.

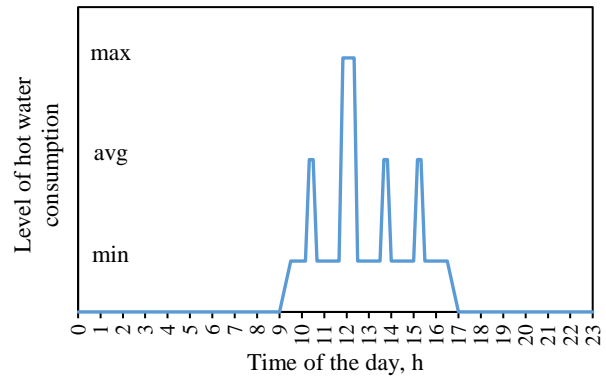


Fig. 1. Approximate chart of water consumption mode of the university:

min – during the classes; avg – during the usual break; max – during the long break.

The graph shows that the building's water consumption pattern is uneven, with short-term peaks with maximum and average consumption and long-term periods with minimum and zero water consumption.

There are two main ways to prepare hot water: in a storage tank with coil and in a flow-through heat exchanger [7].

Water heating in a storage tank with coil requires significantly less capacity from the heat source compared to a flow-through heat exchanger, as it involves the accumulation of hot water to cover the peaks of water consumption. It should be understood that the power of the heat source has a direct impact on its cost and the cost of related equipment. In addition, the selection of a heat source of excessive power will lead to additional heat losses caused by excessive heating during transient periods. For this reason, the method of heating water in a capacitive heat exchanger is advisable to use in cases where the instantaneous heat load of the hot water supply system significantly exceeds the load of the heating system. Also, this method is well suited for buildings where water consumption mode is characterized by short periods of high and medium water consumption and long periods of low or no water consumption. In this mode, the water will be heated during periods of minimal or no water consumption. That is, this method is advisable to use for buildings with a fixed work schedule, without people being constantly present outside of working hours. However, the absence of constant water consumption with insufficient automation will lead to additional heat losses, as the accumulated hot water will gradually cool. This method is not able to provide the set water temperature during long period of water consumption, and therefore is not suitable for buildings characterized by such a mode of hot water consumption.

A hot water supply system that is heated in a

flow-through heat exchanger has a much smaller volume, which means it has less inertia and less heat loss. Due to the rapid heating of water, this method is suitable for buildings with both constant and uneven water consumption. However, it requires a significantly higher heat exchanger capacity and therefore a significantly higher heat source capacity due to the need to quickly heat the required amount of water. Therefore, it is usually not advisable to use it in cases where the instantaneous heat load of the heating system is much lower than the load of the hot water supply system. In addition, such equipment requires the installation of an intermediate buffer tank (intermediate heat accumulator), which will accumulate a certain amount of heat necessary to ensure the operation of the flow heat exchanger until the heat source is started during the non-heating period. It should be noted that there is no need for a large buffer volume, since the response time of the heat source (startup time and reaching the rated mode) is usually about 5 minutes [13].

There is a third method - a combined method that combines the advantages of the first and second methods [14]. The combined method involves installing both the accumulator tank and the high-speed heat exchanger at the same time. That is, the water will be heated in a flow-through heat exchanger and accumulated in the tank. In this case, the flow-through heat exchanger can be of a smaller capacity due to the ability to accumulate the necessary amount of water to pass the peak water consumption. At the same time, the system will be able to provide a longer water extraction, because the high-speed heat exchanger will constantly recharge the tank with freshly heated water. Thus, such a system will fulfill the needs of a building with both constant and uneven water consumption. But the cost of such a system will be much higher.

Any water heater must be selected in such a way that it is able to provide the design hot water flow. The method of calculating a water heater will differ depending on the type of water heating method used. Since the flow-through method involves heating water at the time of water extraction, it is important to select such equipment with the maximum possible hot water flow rate so that the designed heat exchanger is able to heat this flow rate during peak water consumption.

The design maximum flow rate consists of the flow rates of individual faucets dispensers operating simultaneously [7]:

$$q_{tot}^H = q_i^H \cdot n \quad (1)$$

where q_{tot}^H – maximum hot water flow rate by the system, l/s; q_i^H – hot water flow rate by one faucet, l/s; n – a number of faucets operating simultaneously, pcs.

Thus, the highest hot water flow rate will be at the moment when water starts to flow out of all faucets. The likelihood of such an outcome decreases rapidly with the number of faucets, and the difficulty of accurately determining the total flow rate increases. The more faucets are provided in the hot water supply system, the more important it is to take into account the simultaneous use of them. Indeed, if the estimated flow rate is too high, the capital costs will be higher and the potential of the selected equipment will never be used, while if the flow rate is too low, the water heater will not be able to provide the DHW system with the required amount of hot water.

The minimum power of the heat exchanger required to heat water in the flow mode can be determined by the formula [7]:

$$Q_{DHW} = \frac{q_{tot}^H \cdot c \cdot (t^H - t^C)}{3600} \quad (2)$$

where Q_{DHW} – minimum capacity of the heat exchanger required for heating the water in the flow mode, kW; q_{tot}^H – design hot water flow rate, taking into account the simultaneous use of faucets, kg/h; c – water specific heat, kJ/(kg·°C); t^H – temperature of hot water, °C; t^C – temperature of cold water, °C.

The capacity of the heat exchanger is directly dependent on the design hot water flow rate and the temperature difference between hot and cold water. And the heat exchanger capacity, in turn, determines the heat exchange surface area, temperature, and heat carrier flow rate.

The Ukrainian DBN V.2.5-64:2012 Vnutrishnii vodoprovod i kanalizatsiia and the European DIN 1988 standards agree that the temperature of hot water should be at least 55°C, and the temperature of circulating water should be at least 50°C at any point in the system. Moreover, the system should ensure seasonal thermal disinfection at a temperature of at least 70°C. These requirements are put forward to prevent the emergence of the Legionella bacterium. The ability of the bacterium to reproduce is maintained at temperatures from 15°C to 46°C, when the temperature rises to 48°C and above, the bacteria die [7].

When calculating and selecting the heat exchanger, the cold water temperature should be taken for the winter period, that is, equal to 5°C. If the cold water temperature is taken for the summer period,

the temperature difference and therefore the determined capacity will be lower, thus the heat exchanger will not be able to heat the design amount of water during the winter period [15].

The power of the heat exchanger depends directly on the maximum design flow rate, so it is very important to choose a value so that during peak water consumption each consumer receives the required amount of hot water at a given temperature. To determine this cost, it is necessary to refer to regulatory documents and usually its value depends on the purpose of the building, the number and type of devices and the number of consumers. It should be noted that for such facilities as higher education institutions, this hot water flow rate is very difficult to determine due to the significant design number of consumers and the large number of faucets.

The current DBN V.2.5-64:2012 Vnutrishnii vodoprovod i kanalizatsiia states that the total calculated water flow per second should be taken from the annexes depending on the design number of consumers and the calculated average water flow per day for one person or depending on the number of faucets and the average flow rate of these devices per hour. The design number of people in educational buildings is quite large and it is certain that a significant part of them will not use water during the day, and in general, taking into account the smallest maximum average daily flow rate (150 l/day per 1 person) proposed in the applications, we can conclude that this method of determining the total second flow rate is intended for residential buildings. Therefore, when determining the total second flow rate for educational buildings, it is necessary to start from the number of faucets. According to the standard, the design average hourly hot water flow rate is initially determined in accordance with the application given in it. Then, taking into account the number of faucets and the average hot water flow rate per hour, the maximum design hot water flow rate is determined. The values of total hot water flow rate indicated in the appendices of the standard already take into account the simultaneous use of faucets, but the standard does not say anything about the methodology used to determine the simultaneous use of faucets.

SNIP 2.04.01-85, which was in force before the adoption of DBN V.2.5-64:2012, provides a methodology for calculating the maximum flow rate, taking into account the simultaneous use of faucets, depending on the design number of people, the number of devices and hot water flow rate per faucet and the average hourly flow rate per person. These costs are presented in the applications of the document, but they are determined for higher education insti-

tutions with shower rooms, which introduces an error for educational institutions that do not have them. According to the standard, the maximum calculated flow rate can be determined by the formula:

$$q_{tot}^H = 5 \cdot q_i^H \cdot \alpha \quad (3)$$

where q_{tot}^H – maximum design hot water flow rate, l/s; α – coefficient that is adopted according to the applications of the standard, depending on the total number of faucets N and the possibility of their use P .

The possibility of using devices according to SNIP 2.04.01-85 is calculated by the formula:

$$P = \frac{q_{Hr,u} \cdot U}{q_i^H \cdot N \cdot 3600} \quad (4)$$

where $q_{Hr,u}$ – average hot water flow rate per hour per person, l/h, is accepted according to the application of the standard; U – total number of consumers; q_i^H – hot water flow rate by one faucet, l/s; N – total number of faucets.

In order to calculate the maximum design flow rate for simultaneous use of devices according to DIN1988, the hot water flow rate of a single faucet first needs to be determined. The value is taken according to the applications of the standard. The maximum design flow rate for administrative buildings with a total flow rate $\sum q_i^H \leq 20$ l/s is determined by the formula:

$$q_{tot}^H = 0,682 \cdot (\sum q_i^h)^{0,45} - 0,14 \quad (5)$$

where q_{tot}^H – maximum design hot water flow rate, l/s; q_i^H – hot water flow rate by one faucet, l/s.

At the same time, the hot water flow rate of one faucet specified in this standard is valid at hot water temperatures $t^H = 55^\circ\text{C}$ and cold water $t^C = 15^\circ\text{C}$. That is, they are valid only for the summer period. For the winter period, they need to be recalculated. To do this, it is necessary to determine the temperature of the mixed water using the formula:

$$t_{mix} = \frac{t^H \cdot q_i^H + t^C \cdot q_i^C}{q_i^H + q_i^C} \quad (6)$$

where t_{mix} – temperature of mixed water, $^\circ\text{C}$; q_i^H , q_i^C – volumetric flow rate of hot and cold water by one faucet, l/s; t^H – temperature of hot water, $^\circ\text{C}$; t^C – temperature of cold water, $^\circ\text{C}$.

Then, by solving the inverse task, substituting

the temperature of cold water in winter and the resulting mixed temperature into formula (6), the flow rate of cold and hot water for the winter period is found at the same total flow rate and mixed temperature.

Another method for determining the maximum design flow rate of hot water with a known number of faucets is given in [7]. Since it is not economically practical to design a system for a level of water consumption that will occur very rarely or not at all, the total design flow rate can be determined by assuming how often it will be exceeded. The total second consumption of hot water is determined based on the number of faucets using the formula:

$$q_{tot}^H = a\sqrt{N} + bN \quad (7)$$

where a and b – coefficients of approximating dependencies; N – number of faucets ranging from 40 to 300.

The coefficients a and b given in [7] were calculated for the curves of maximum second hot water consumption with an assumed possibility of exceeding, based on water consumption studies conducted in 2001-2003 in Szczecin, Poland.

As a result of calculating the total design hot water flow rate for the main building of KNUCA from four different sources, it was found that the obtained values range from 1.03 to 2.66 l/s, which means that they are quite wide. To determine the methodology that is closest to reality, we conducted observations of the water consumption regime of the main building of KNUCA.

The maximum possible design hot water flow rate depends on two factors: the average hot water consumption by one device and the maximum number of devices that can operate simultaneously.

The most accurate method for measuring the flow rate of each device is to use ultrasonic flowmeters of the inline type. In our case, there was no such possibility, so to determine the flow rate of hot water by one device, we had to resort to the volumetric measurement method, and to reduce the measurement error, the number of flow measurements by each device was taken equal to ten, with subsequent calculation of the root-mean-square measurement error. It should be noted that when determining the flow rate by one device using the volumetric method, the flow rate of exactly the mixed water was measured, and with the help of calculations for determining the ratio of cold and hot water flow rates, the flow rate of hot water by each device was determined.

The studies described in [7] indicate that peo-

ple's preferences for a comfortable water temperature vary widely. On average, human hands perceive water with a temperature of 33°C as "neutral", with a temperature of 40°C – as "warm" and with a temperature of 48°C – as "hot". Human heat perception is almost linearly dependent on water temperature. During the measurements, the temperature of the mixed water was set at $t_{mix} = 37^\circ\text{C}$, because this value is in the middle of the range from "neutral" to "warm".

To measure the flow rate, 3 liters and 5 liters measuring vessels, a thermometer, and a stopwatch were used. At first, the temperature of cold and hot water was measured separately using a thermometer and the faucet was set to a position where the thermometer immersed in the water jet showed a temperature of 37°C. The measuring vessel was placed in the washbasin so that the flow of water was directed into the vessel. At the moment the faucet was opened, the stopwatch started counting and ended when the measuring vessel was filled to 3 or 5 liters (due to the installation of some devices, it was impossible to measure everywhere with a 5-liter vessel). In this way, measurements were made on the 7th, 4th, 3rd and 1st floors, 10 times in each WC and with the faucets open at 50 % and 100 %. The measurement results were averaged and the root-mean-square measurement error was estimated for each averaged value according to the method [16]. From the obtained mixed water flow rates, the hot water flow rates for each WC were determined using formula (6), and the results are presented in a histogram (fig. 2).

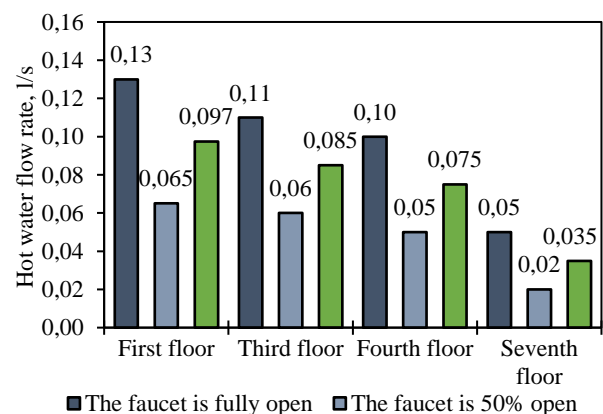


Fig. 2. Average hot water flow rate by one faucet in the main building of the university

The histogram shows that due to the pressure difference, the flow rate on the 1st floor is 60 % higher than on the 7th floor. From the presented range of flow rates, the value that is fair for the entire system was taken - the average between floors. It was also taken into account that there are no classrooms on the 7th floor, and therefore the WCs are

used much less frequently there. Therefore, the consumption of this floor was not taken into account in the averaging.

As for the faucet openness, it was assumed that most people open the faucet at least 50 % in order to wash their hands faster, but not 100 % to avoid splashing water droplets. Therefore, the hot water flow rate was also averaged between 50 % and 100 % openness of the faucets. The average volumetric hot water flow rate by one device determined by this method is $q_i^H = 0,086$ l/s.

The total number of faucets installed in the WCs of the university's main building is 62. The highest consumption will occur when water starts pouring out of all the faucets. Since the building has only washbasins and the fact that people spend no more than a minute washing their hands, the possibility of this outcome is close to zero. It is possible to determine the actual number of faucets that can operate simultaneously by using water consumption monitoring. The greatest accuracy of this monitoring can be achieved by monitoring the water consumption mode of a building during periods of the most active use over a long period of time using ultrasonic flow meters.

In our case, the hot water consumption is measured using tachometric volumetric meters that measure the total volume of water flowing through their cross-section, but they cannot accurately track the peak instantaneous hot water flow rate needed to determine the load of the instantaneously heated DHW system. For this reason, it was necessary to determine the maximum simultaneous use of faucets by observing the use of faucets during the largest periods of water consumption - breaks between classes.

It can be stated with sufficient accuracy that the main consumers of hot water in the main building of KNUCA are students, so the maximum level of water consumption will occur during breaks (fig. 1). All observers monitored the time of opening and closing the faucets and the degree of openness of the faucets and recorded the data in tables. It should be noted that the observers used the exact synchronized time in Kyiv from the source [17] to record the opening and closing times of the faucets. The results of observations of the building's water consumption mode during breaks are shown in fig. 3.

The graphs show that the longest water withdrawal periods were during the second (long) and third breaks. At the same time, the highest level of

water consumption occurred only during the long break. At that moment, water was being drawn from four faucets simultaneously, and its total duration was only 20 seconds.

During the observations, it was found that in most cases the faucets were opened between 50 % and 100 %, as expected. In addition, the time spent by consumers washing their hands averaged about 10 seconds, but in WCs with handwashing facilities, the faucets were running slightly longer. Substituting the value of the average hot water flow rate per device and the maximum recorded number of faucets operating simultaneously in formula (1), the maximum hot water consumption per working day of the university was determined, it is 0,344 l/s.

The results of calculating the total second hot water flow rate and the design heat load of the DHW system in the flow heating mode for the main building of KNUCA, determined by different methods, are presented in table 1. The number of simultaneously operating faucets in determining the total hot water flow rate by different methods is shown in the histogram in fig. 4.

Table 1.

A comparison of methods for determining the design hot water flow rate

Methods		Hot water flow rate by one faucet, l/s	Total water flow by the hot water supply system, l/s	Design capacity of the heat exchanger, kW
DBN V.2.5-64:2012		–	1,06	220
SNIP 2.04.01-85		0,090	2,66	553
DIN1988		0,085	1,30	270
Approximating dependence with probability of exceedance [7]	0,1 %	–	1,15	239
	1,0 %		1,03	214
	10 %		0,88	182
Monitoring of the real mode of hot water consumption		0,086	0,344	71

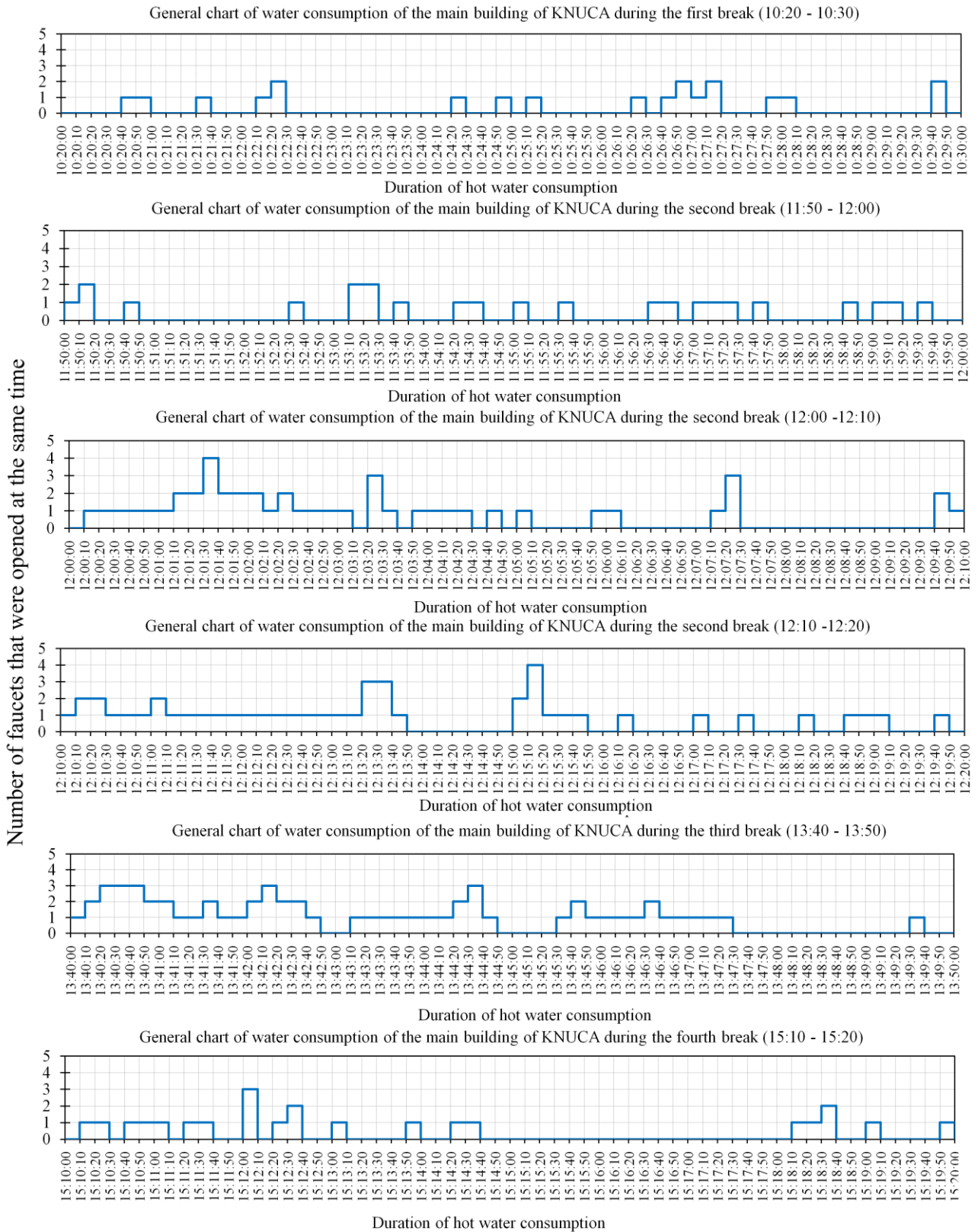


Fig. 3. Water consumption chart of the main building of KNUCA during breaks

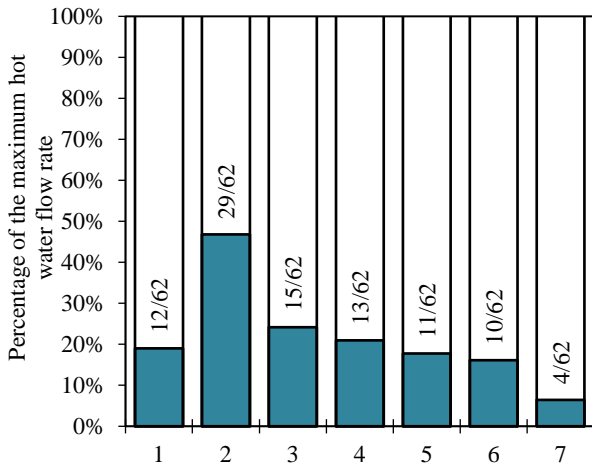


Fig. 4. The number of simultaneously operating faucets when determining the hot water flow by different methods: 1 – DBN V.2.5-64:2012; 2 – SNIP 2.04.01-85; 3 – DIN1988; 4 – an approximating dependence with a possibility of exceeding 0,1% [7]; 5 – with a possibility of exceeding 1% [7]; 6 – with a possibility of exceeding 10% [7]; 7 – monitoring the real mode of hot water consumption;

Conclusions. When determining the total hot water flow rate q_{tot}^H for the main building of the university according to the current DBN V.2.5-64:2012, 12 out of 62 washbasins can operate simultaneously without reducing the temperature of hot water. The document does not contain the design hot water flow rate by one faucet q_i^H and does not describe the methodology for calculating the simultaneous use of devices. If we compare this flow rate with those that are determined by the approximating relationship according to [7], then the difference will be only a few percent. Therefore, the possibility of exceeding the consumption determined by DBN V.2.5-64:2012 will also be less than 1 %. However, it should be noted that the studies described in [7] were conducted on residential apartment buildings, so it cannot be argued that the calculated coefficients will be equally suitable for university buildings. Residential buildings are also characterized by peaks in water consumption, even longer ones, but the ratio of the number of consumers to the number of faucets in them is significantly different, which will directly affect the simultaneous use of faucets.

The DIN 1988 standards give the values of the second flow rate by one device for the summer period (at $t^C = 15\text{ }^\circ\text{C}$), for the winter period (at $t^C = 5\text{ }^\circ\text{C}$) they must be recalculated. The flow rate determined by the DIN1988 methodology is only 5 % higher than the flow rate according to the DBN V.2.5-64:2012. However, it should be noted that due to the absence of coefficients for educational buildings in the standard, the coefficients for administrative buildings were used for the calculation. Unlike the consumption mode of educational buildings, the

water consumption mode in administrative buildings is more uniform, so the values obtained by this method cannot be considered more accurate.

In the methodology presented in SNIP 2.04.01-85, the value of the total hot water flow rate directly depends on the number of consumers and the design hot water flow rate per person. The design hot water flow rate per person presented in the document is determined for higher education institutions with shower rooms, and therefore it can be argued that it is overestimated for educational institutions without them. The need to specify the exact number of consumers indicates that this method is oriented towards calculating consumption for residential buildings. After all, when designing a DHW system for residential buildings, the number of apartments is known, and therefore the number of consumers who are likely to use the installed faucets on a regular basis is more accurate. For educational buildings, it is much more difficult to determine the exact number of consumers. Due to the considerable difficulty in calculating the exact number of consumers due to the large total number of consumers and the unpredictability of their visits to the WCs, an approximate number of consumers was used for the calculation: 5000 people. As a result of the overestimated hot water flow rate per person and the likely overestimated number of consumers, the total design hot water flow rate calculated according to SNIP 2.04.01-85 is 27 % higher than the hot water flow rate determined according to DBN V.2.5-64:2012. Therefore, the value obtained by this method cannot be considered more accurate either.

The maximum possible hot water flow rate determined as a result of monitoring under the actual water consumption mode was almost 70 % less than the hot water flow rate of the current DBN B.2.5-64:2012. However, although this hot water flow rate was determined directly at the facility, this does not mean that this result is the most accurate, because at the time of the observations, the education at the university was in mixed form. Although the time chosen for the monitoring was when most students had practical classes at the university, a significant number of them were taking lectures that were conducted online. In addition, the time period for which the observation was conducted is too short to draw definitive conclusions.

At this stage, it is difficult to determine which of the above methods should be used for higher education buildings. Since each of them has its drawbacks. To solve this problem, it is necessary to study the water consumption mode of educational buildings in more detail and over a longer period. To conduct this study, it is necessary to install ultrasonic flow meters on hot and cold water pipelines and

monitor the change in flow throughout the academic

year. This will make it possible to correct the existing methods and determine the most accurate one.

References

1. Glamazdin, P. M., Baranchuk K. O. "Novi pidkhody do orhanizatsii tsentralizovanoho teplopostachannia." *Ventyliatsiia, osvittleniia ta teplohapostachannia : Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 39, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2021, pp. 38-46.
2. Glamazdin P. M., Shvachko N. A. "Problemy modernizatsii system tsentralizovanoho teplopostachannia malykh mist." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, Iss. 8, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 286-291.
3. Taradai O. M., Fomich S. V., Glamazdin P. M. "Mozhlyvosti znyzhennia avariinosti merezh tsentralizovanoho hariachoho vodopostachannia shliakhom deaeratsii vody." *Ventyliatsiia, osvittleniia ta teplohapostachannia : Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 19, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 117-124.
4. Glamazdin, P. M., Zhuravska N. E., Sirokhina E. O. "Solar systems with high-temperature organic heat carriers". Energy-saving innovations in architecture and construction ESIAC 2021, Baku, 2021, pp. 251-59.
5. Chukhliebov O. V., Krietov R. O., Andrieieva N. Yu., Holdun V. Yu. "Modeliuvannia rezhymiv roboty systemy hariachoho alternatyvnoho vodopostachannia v zakladi vyshchoi osvity na pivdni Ukrainy." *Naukovi pratsi. Seriia: Tekhnohenna bezpeka*, 2012, pp. 17-22.
6. Klymenko, L. P., Voskoboinikova N. O. "Zastosuvannia alternatyvnykh dzherel enerhii yak zasib pidvyshchennia enerhoefektyvnosti universytetu." *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dizainu*, Iss. 6, 2013, pp. 45-49.
7. Shaflyk V. "Sovremennii systemy horiacheho vodosnabzheniia." «Taki spravy», 2010.
8. Selikhov, Yu. A., Kotsarenko V. O., Riabova I. B., Horbunov K. O., Khurani Zh. S. "Vykorystannia dvokonturnykh heliustanovok dlia hariachoho vodopostachannia". *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, Iss. 3, 2016, pp. 30-34.
9. Stepanova, N. D., Kolomiets I. O. "Efektyvnist vykorystannia heliokolektoriv dlia potreb hariachoho vodopostachannia v teplovii skhemi tverdogopalivnoi vodohriinoi kotelni". *VNTU*, 2020.
10. Stepanova, N. D., Dziadyk A. A. Heliustanovka dlia systemy hariachoho vodopostachannia v teplovii skhemi vodohriinoi kotelni na hazovomu palyvi, *VNTU*, 2020.
11. Postol Yu., Hlazyrin I. "Vykorystannia soniachnoi enerhii dlia teplovodopostachannia system hariachoho vodopostachannia v individualnomu zhytlovomu budivnytstvi". *Rozvytok suchasnoi nauky ta osvity : realii, problemy yakosti, innovatsii, Zaporizhzhia*, 2022, pp. 114-119.
12. Matyakh, S. V., Surzhyk T. V., Rieztsov V. F. "Determination of the efficiency of solar hot water systems implementation". *Vidnovluyana Energetika*, Iss. 60, 2020, pp. 17-22.
13. "Kataloh produktsii ta tekhnichnykh rishen - Flamco Meibes". Flamco Meibes, www.meibes.ua/downloads/katalog.html.
14. Baron H. V. "Goryachee vodosnabzhenie obektov s yavno vyrazhennoj neravnomernostyu vodopotrebleniya". *Energoberezhenie*, Iss. 3, 2005, pp. 17-20.
15. Dshko, V. I., Shovkaliuk M. M. "K voprosu o vliyanii pogodnykh uslovij na effektivnost teplosnabzheniia". *Promyshlennaya teplotehnika*, Iss. 29, № 7, 2007, pp. 88-91.
16. Squires, G. L. *Practical physics*. McGraw-Hill, 1968.
17. "Time.is accurate time, any time zone". *Time.is*, time.is/uk.

УДК 696.48

Вибір методики розрахунку теплового навантаження систем гарячого водопостачання об'єктів зі значною нерівномірністю споживання

П. М. Гламаздин¹, Н. В. Чепурна², Б. І. Козячина³

¹доц. КНУБА, м. Київ, Україна, sib.kiev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2611-2687

²к.т.н., доц. КНУБА, м. Київ, Україна, chepurnayanv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8044-7563

³асп. КНУБА, м. Київ, Україна, bohthankoziachyna@gmail.com, ORCID: 0009-0000-6972-3862

Анотація. Останні роки в Україні постійно зменшується обсяг надання послуги централізованого теплопостачання. При цьому зниження обсягу надання послуги гарячого водопостачання по відношенню до централізованого опалення та вентиляції відбувається більш інтенсивно. Це призводить до розрегулювання існуючих систем централізованого теплопостачання і, як наслідок – до перевитрат енергоносіїв. Один із шляхів вирішення цієї проблеми лежить в площині зменшення вартості обладнання за рахунок більш точного вибору його потужності. Уточнення існуючих методик з визначення потужності обладнання можна досягти шляхом врахування особливостей режиму водорозбору

систем, що може значною мірою відрізнятися в залежності від призначення будівлі. Особливо актуальним є точне прогнозування потужності системи гарячого водопостачання для об'єктів з яскраво вираженою нерівномірністю споживання гарячої води. Це стосується деяких громадських будівель та будівель навчальних закладів, що змушує звернутися до дослідження цієї проблеми. В даній роботі на прикладі будівлі головного корпусу КНУБА обґрунтовано проблему визначення загальної витрати гарячої води для будівель, для яких характерний нерівномірний режим водоспоживання. Проведено аналіз можливих способів нагріву води та запропоновано той, що є найбільш доцільним для будівель вищих навчальних закладів. Представлено порівняння методів з визначення максимальної розрахункової витрати гарячої води, прийнятих в нормативних документах. Описано недоліки кожного з існуючих методів. Проведений моніторинг за дійсним режимом водоспоживання будівлі головного корпусу КНУБА, в результаті якого визначено реальну максимальну витрату гарячої води протягом робочого дня університету. Та проведено порівняння отриманих результатів із розрахунковими витратами, визначеними за допомогою методик прийнятих в кількох нормативних документах.

Ключові слова: гаряче водопостачання, теплове навантаження системи ГВП, одночасність використання водорозбірних приладів, загальна витрата гарячої води, нерівномірність режиму водоспоживання.

Надійшла до редакції / Received 09.01.2023

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 44

Визнаний МОН України як наукове фахове видання України категорії “Б”, у якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття ступенів доктора і кандидата наук (Наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р.)

Збірник «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» представлений на сайті <http://www.nbuv.gov.ua> національної бібліотеки НАН України ім. В. І. Вернадського та на сайті КНУБА (<http://vothp.knuba.edu.ua/>).

Підписано до друку 07.02.2023. Формат 60×84 1/8
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 6,63. обл. вид. арк. 7,21.
Наклад 100 прим. Замовлення № 161404

