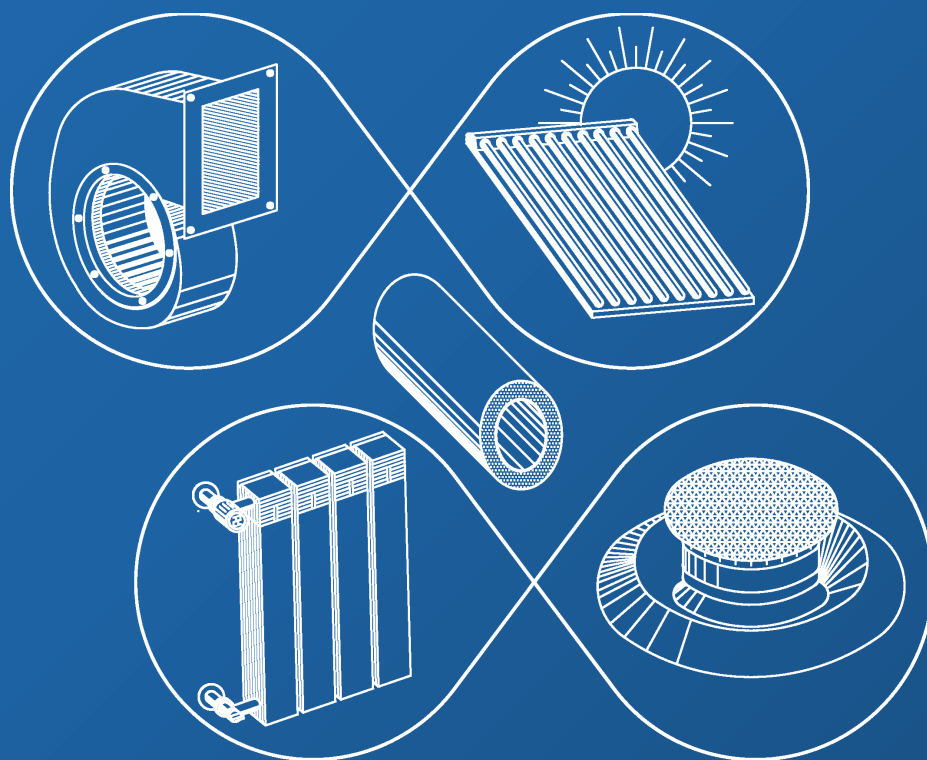


ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2024

Випуск 49



КИЇВ 2024

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 49

Kyiv 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 49

Київ 2024

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 49 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2024. – 82 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 28 червня 2024 р., протокол № 23.

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

<i>До відома авторів.....</i>	<i>6</i>
Олександр Демидов, Леонід Косенко, Олена Коваль, Євгеній Юрченко	
<i>Дослідження та моделювання освітлення офісного приміщення.....</i>	<i>7</i>
Олег Березюк, Михайло Лемешев	
<i>Регресійна залежність динаміки зростання кількості біогазових установок в Україні.....</i>	<i>16</i>
Степан Мисак, Степан Шаповал, Галина Матіко	
<i>Енергоефективна система сонячного теплопостачання на основі гібридного геліоколектора.....</i>	<i>26</i>
Павло Гламаздін, Богдан Козячина	
<i>Врахування кліматичних змін при побудові графіка Росандера.....</i>	<i>38</i>
Віктор Мілейковський, Володимир Вахула, Олексій Дудніков	
<i>Теоретичні дослідження організації повітрообміну з багатострумінними повітророзподільниками.....</i>	<i>56</i>

C O N T E N T S

To the authors..... 6

Oleksandr Demydov, Leonid Kosenko, Olena Koval, Evhenii Yurchenko

Research and simulation of an office lighting..... 7

Oleh Bereziuk, Mykhailo Lemeshev

Regression dependence of the number growth dynamics of the biogas plants in Ukraine..... 16

Stepan Mysak, Stepan Shapoval, Prof. Halyna Matiko

Energy-efficient solar heat supply system based on hybrid photovoltaic collector..... 26

Pavlo Glamazdin, Bohdan Koziachyna

Accounting for climate changes when constructing the Rossander graph..... 38

Viktor Mileikovskiy, Volodymyr Vakhula, O

Theoretical studies of air exchange organization using multi-flow air distributors..... 56



ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Шановні автори!

Запрошуємо Вас до публікації статей у ювілейному 50-му випуску збірника «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання». Прохання до авторів суворо дотримуватися правил оформлення рукописів. Особливу увагу просимо приділити якості та чіткості зображень. Редколегія працює в екстремальних умовах постійних повітряних тривог та нестабільного електропостачання. Тому якість оформлення рукописів є Вашим внеском у своєчасність випуску збірників.

TO THE AUTHORS

Dear authors!

We invite you to publish articles in the 50th Anniversary issue of the collection "Ventilation, lighting and heat and gas supply". Authors are requested to strictly adhere to the rules for the preparation of manuscripts. Please pay special attention to the quality and clarity of the images. The editorial board works in extreme conditions of constant air alarms and unstable power supply. Therefore, the quality of manuscript design is your contribution to the timely release of collections.

УДК 628.9

студент., **Олександр Демидов**,
22249-eeb.demydov@365.pdaba.edu.ua, ORCID: 0009-0008-4061-0010,
аспірант., **Леонід Косенко**,
kosenko.leonid@365.pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8841-8318,
к.т.н., доц., с.н.с. **Олена Коваль**,
koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7805-6811,
к.т.н., доц., **Євгеній Юрченко**,
yel@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9356-3261,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОСВІТЛЕННЯ ОФІСНОГО ПРИМІЩЕННЯ

***Анотація.** У роботі детально розглянуто оцінювання та оптимізацію освітлення в офісах задля поліпшення енергоефективності та робочого середовища через впровадження передових освітлювальних технологій. Всебічне технічне обстеження наявних умов освітлення та розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій враховує нормативні вимоги й сучасні практики у сфері світлотехніки. Виконується аналіз ефективності освітлення, обґрунтування доцільних джерел світла, розрахунок їхнього розміщення для максимальної ефективності та оцінювання впливу на економію енергії з метою досягнення кращих умов праці та зниження енергоспоживання. Дослідження передбачає такі кроки: освітленість як критичний фактор, що впливає на продуктивність та комфорт працівників; технічне обстеження системи освітлення в офісному приміщенні; методологію проведення технічного обстеження (вимірювання освітленості на різних ділянках приміщення за допомогою люксметра); розрахунок потреби у світловому потоці відповідно до норм та стандартів для офісних приміщень; вибір типу та потужності світлодіодних ламп для нової системи освітлення; розрахунок кількості та розміщення світлодіодних ламп для забезпечення необхідного рівня освітленості в автоматизованій системі DIALux Evo Pro; оцінювання очікуваних результатів у контексті енергоефективності та покращення умов праці; розрахунок витрат енергії на нову систему освітлення; потенційний вплив результатів дослідження на енергоменеджмент і енергоаудит у сфері будівництва. висновки дослідження пропонують стратегії для реалізації інноваційної освітлювальної системи, яка веде до оптимізації споживання енергії та значного поліпшення якості освітлення. Ці стратегії очікується, що не лише покращать робоче середовище, але й призведуть до суттєвої економії енергетичних ресурсів у офісах, тим самим сприяючи екологічній стійкості та фінансовій ефективності.*

Ключові слова: інсоляція, освітленість, енергоефективність, охорона праці, модернізація, дослідження

Вступ. У сучасному світі освітлення офісних приміщень стає важливим аспектом діяльності будь-якого підприємства. Якісне освітлення та інсоляція є одним з найважливіших факторів для комфорту та продуктивності працівників. Але, разом із зростанням усвідомлення необхідності створення сприятливих умов для працівників, з'являються нові вимоги до енергоефективності освітлення в офісних приміщеннях. Виявлення проблем освітлення та пошук якісних рішень стає важливою задачею [1, 2].

Огляд літературних джерел. В Україні світловий комфорт визначається нормами, зокрема [1, 2]. Спектр освітлення відіграє важливу роль для зорового комфорту [3]. Найбільш близькими до ідеально неперервного спектру розжареного абсолютно чорного тіла є лампи розжарювання та галогенні [3]. Однак, навіть вони не досягають ідеальності через випромінювання окремих хімічних елементів. Сонце є ще менш ідеальним джерелом, спектр якого додатково спотворюється в атмосфері. Джерела світла характеризуються індексом кольоропередачі (Colour Rendering Index) $0 < R_a < 100$. Чим вищий показник, тим ближче кольоропередача до ідеальної. Однак, цей показник не до кінця визначає комфорт сприйняття кольорів. Адже він не показує розподіл відхилення насиченості за довжиною хвилі.

Освітленість [4] є одним з головних факторів, що визначає зоровий комфорт і продуктивність праці, зокрема офісної. Якщо недостатнє освітлення призводить до неможливості виконання роботи, то занадто інтенсивне освітлення спричиняє головні болі, втому, стрес, тривожність тощо. У цій же роботі показано можливість використання сучасного смартфона для вимірювання освітленості за умови калібрування його датчика.

Відблиски є ще одним фактором, що негативно впливає на зоровий комфорт. Відблиски визначаються, серед іншого, властивостями світильників, їхнім розміщенням, розмірами та формою, відбиттям поверхонь і положенням спостерігача. Уніфікований індекс відблисків UGR (Unified Glare Rating) показує рівень відблисків і типово потрапляє в межі 16...28. Збільшення показника означає зростання дискомфорту. Значення 19 і менше показує високий рівень комфорту для офісів, а 22 і менше – для виробництва. Світлодіоди як джерела світла [6] на сьогодні витісняють усі інші джерела через високу ефективність (до 170 лм/Вт), відсутність важких металів, практичну відсутність ультрафіолетового випромінювання, практично необмежені можливості комбонування світлодіодів у світильники, досяжність дуже високої кольоропередачі (R_a 98 [3]), мінімальні вимоги до утилізації тощо. Тобто саме це джерело світла має найбільші перспективи щодо комфортного, енергоефективного та екобезпечного освітлення.

Природне (сонячне) освітлення відіграє не менш важливу роль у

формуванні психологічного стану людини як найбільш наближене до природних умов. Але згідно з [1,2] озеленення не можна враховувати при розрахунках, а освітленість є нерівномірним і сильно залежить від геометрії як вікон, так і приміщення. Лишається питання, чи завжди великі площі вікон призводять до покращення освітленості. З урахуванням багатofакторності задачі це вимагає окремого підтвердження або спростування.

Мета дослідження. Метою дослідження є поглиблення методологічних засад при оцінюванні інсоляції та освітленості приміщень та розробки оновлення системи освітлення з залученням програмних рішень.

Об'єкт дослідження. Двоповерхова офісна будівля місто Дніпро (рис. 1). Вона має другий частково мансардний поверх з великим віражним склінням площа цього приміщення (зони open space) 136.56 м². Приміщення має 18 автоматизованих робочих місць. Освітлення – 20 світлодіодних лампи Brille 24W/864 E27 CW G95 (PL-SP) 220V на висоті 2.8 м.

Завдання дослідження. Згідно з поставленою метою були сформовані основні задачі дослідження, а саме:

1. Технічне обстеження системи освітлення в офісному приміщенні.
2. Виміри освітленості на різних ділянках приміщення за допомогою люксметра.
3. Розрахунок потреби у світловому потоці відповідно до норм та стандартів для офісних приміщень.
4. Вибір типу та потужності світлодіодних ламп для нової системи освітлення.
5. Розрахунок кількості та розміщення світлодіодних ламп для забезпечення необхідного рівня освітленості в автоматизованій системі DIALux Evo Pro.
6. Розрахунок витрат енергії на нову систему освітлення [1;2].

Обстеження та вимірювання. Обстеження системи освітлення виявило проблему точкового освітлення лампами над окремими робочими місцями, що додатково знижує освітленість приміщення.

Попередньо було проведено вимірювання освітленості в цьому приміщенні (рис. 2). Вимірювання проводилися в сонячну погоду об 11 годині ранку у другий тиждень жовтня.

Для вимірювання освітленості зон приміщення було використано (рис. 3):

- **Testo 440** – люксметр з виносним зондом для вимірювання освітленості всіх типів ламп, професійний багатофункціональний прилад з заводським калібруванням
- **FLUS MT-912** – портативний люксметр для вимірювання освітленості на побутових і виробничих об'єктах з розширеним діапазоном до 200000 Лк
- **Смартфон Xiaomi Redmi Note 8 Pro** з застосунком Lux відкалібрований за допомогою **Testo 440**

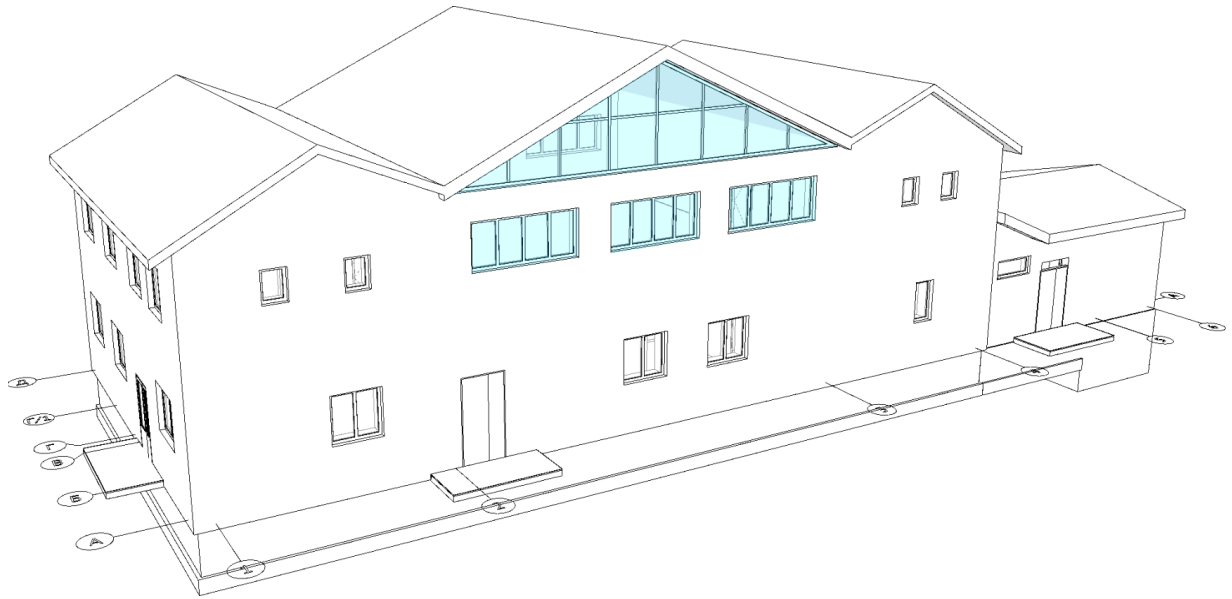


Рис.1. Загальний 3D вид об'єкту (кольором позначено віконні огорожувальні конструкції офісного приміщення)

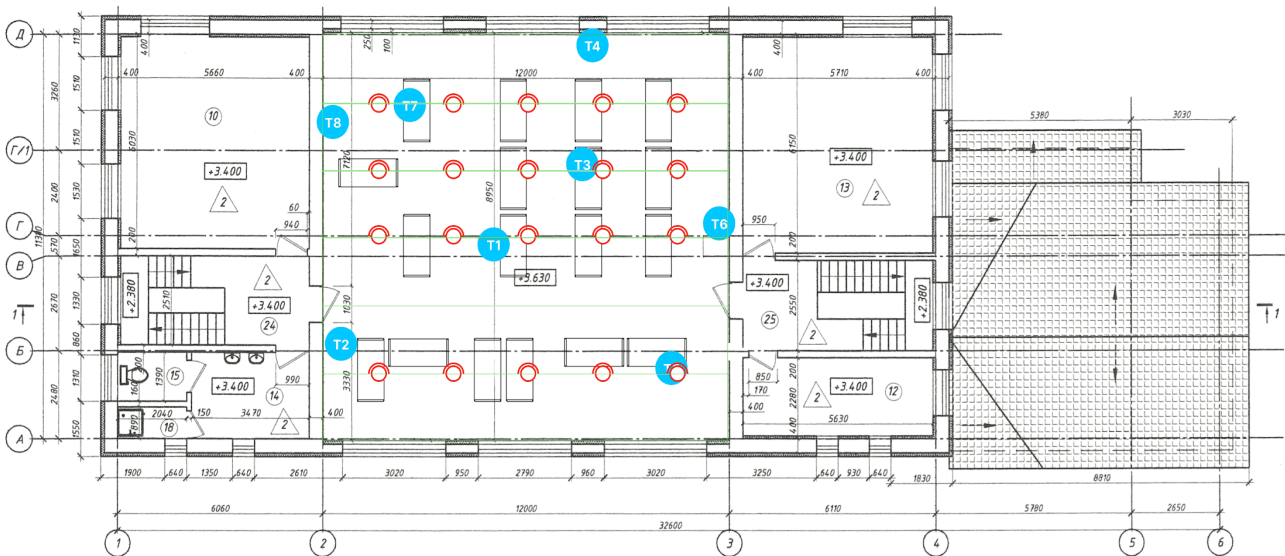


Рис.2. Схема розташування точок вимірювань (T) освітленості та розташування наявних світильників (O) з кріпленням до основи металевих ферм даху

За результатами вимірювання (рис. 4) всі три способи дають допустиме відхилення крім випадків екстремально малої освітленості (40...60 лк). Треба відзначити, що використання смартфона як люксметра має свої переваги та недоліки. Серед переваг можна відзначити доступність та портативність цього пристрою. Проте важливо пам'ятати про обмежену точність у вимірюванні освітлення, оскільки кожен смартфон має унікальний датчик освітленості. Для отримання точних результатів, необхідно регулярно калібрувати смартфон та враховувати його обмежені можливості у вимірюванні освітлення [4].

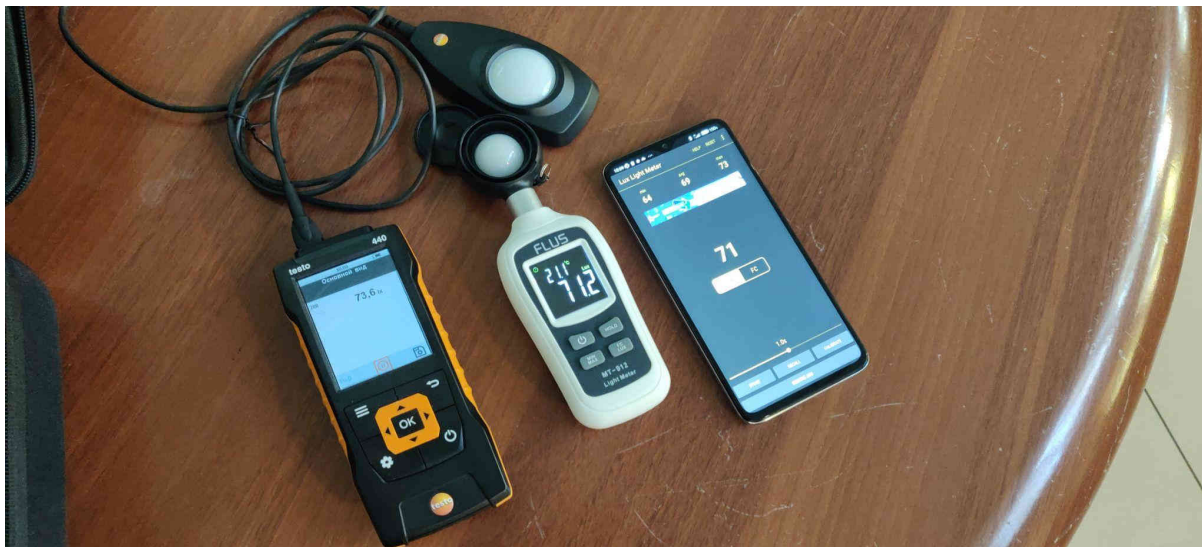


Рис.3. Використані прилади для дослідження з ліва на права: Testo 440, Flus MT-912, смартфон Redmi Note 8 Pro

Аналіз результатів вимірювань. Середня освітленість автоматизованих робочих місць у приміщенні з постійним перебуванням людей становить 241 Лк від змішаного освітлення. За нормами [1, 2] вона повинна бути не менше ніж 500 Лк. Також заміри освітленості природним світлом демонструють дуже низькі для праці значення освітленості від віконних конструкцій.

Цьому сприяє затінення будівлі деревами та архітектурне рішення. Слід зазначити, що за [1, 2] при розрахунках освітленості та інсоляції озеленення не враховують, що часто сприяє незаконному винищенню рослинності.

Таким чином, велика площа скління не завжди надає переваги для освітлення приміщення. Це пов'язано з неврахуванням рослинності. Також природне освітлення спрямоване більше на вертикальні неробочі поверхні та недостатнє в денний час. Тому потрібен пошук варіантів заміни штучного освітлення на енергоефективні рішення зі зменшенням площі скляних конструкцій для зменшення тепловтрат. Наявна система освітлення не відповідає нормам для офісних приміщень та не є енергоефективною.

Наявна система освітлення має 20 світлодіодних ламп Brille 24W/864 E27 CW G95 (PL-SP) 220V з світловий потоком: 1415 лм (біля 60 лм/Вт) на наявних фермах (рис. 5). Висота розташування ламп 2,8 м. Річна потреба в електроенергії 1233 кВт·год/рік.

Розрахуємо необхідний світловий потік потрібний для досягнення 500 Лк на робочих поверхнях в приміщенні. Висота розташування світильників 3,6 м. (нижня лінія конструкцій ферм) за методом коефіцієнта використання світлового потоку при індексі приміщення 2,0. Отримано потрібний світловий потік 93 885 лм. Використовуємо 20 джерел світла, не менше 4694 лм кожне.

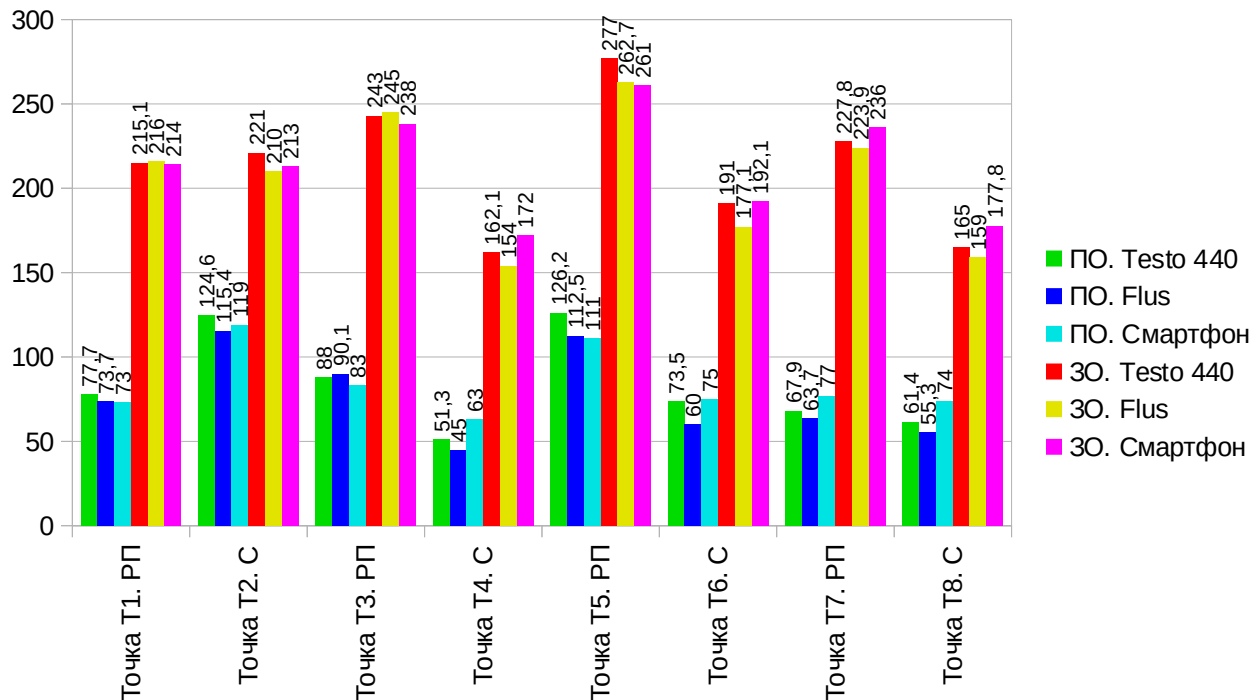


Рис.4. Результати вимірювання: РП – робоча поверхня; С – стіна; ПО – природне освітлення; ЗО – змішане освітлення



Рис. 5. Наявна металева ферма даху для моделювання освітленості

Варіант 1. Світильник 3F Filippi S.p.A. - L 650 42W/840 DALI EP VSS 596x596 з світловий потоком: 4958 лм (біля 120 лм/Вт) UGR (Unified Glare Rating) < 19, мінімальний індекс кольоропередачі (Colour Rendering Index) $R_a = 90$, що відповідає [2,3,5]

Проведено розміщення світильників та моделювання (рис. 6) освітлення в системі DIALux Evo Pro. Для цього BIM модель будівлі імпортовано із Autodesk Revit за допомогою IFC формату.

2376 кВт год/рік

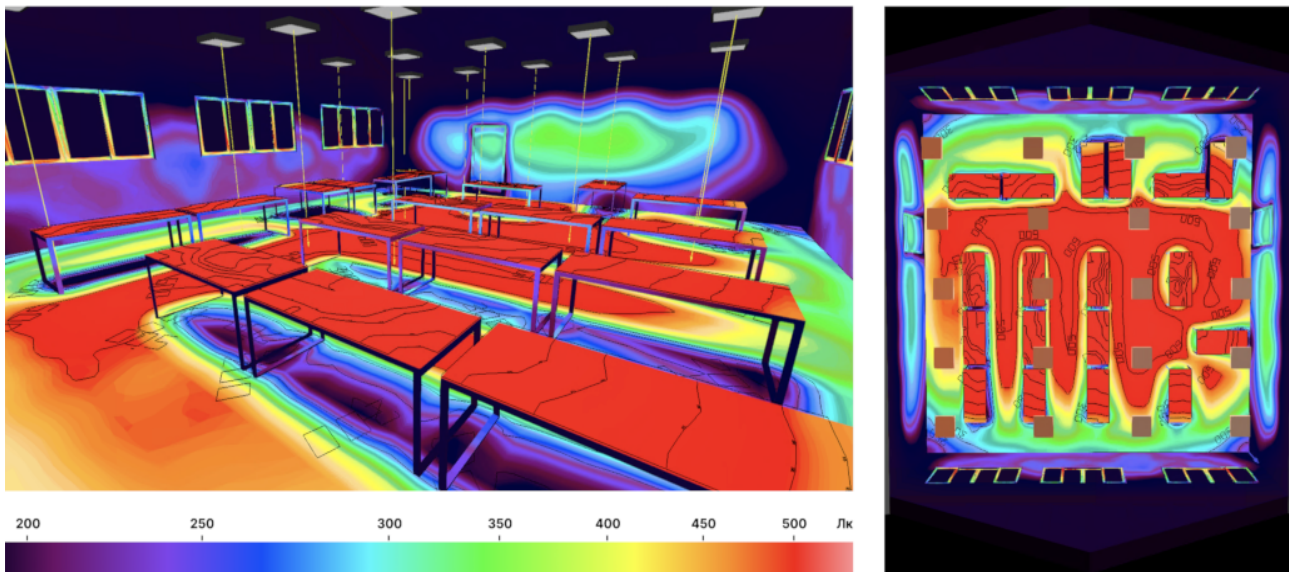


Рис. 6 Умовна кольорова візуалізація моделі освітлення приміщення **Варіант 1**

Модель не враховує вплив природного освітлення для створення комфортних робочих умов в вечірній час. Нова система освітлення потребує 2376 кВт·год/рік

Варіант 2. Світильник Philips LL512X LED50S/840 WB He, 29 Вт з світловим потоком 4994 Лм, (170 лм/Вт) мінімальний індекс кольоропередачі (Colour Rendering Index) $R_a > 80$, UGR (Unified Glare Rating) = 19. Результати моделювання (рис. 7) показують відповідність нормам для офісних автоматизованих робочих місць [2,3,6]. Система освітлення потребує 1436 кВт·год/рік.

Таким чином, комп'ютерне моделювання освітлення дозволяє швидко вибрати доцільні рішення. Більш якісна з точки зору передачі кольорів система освітлення (варіант 1) потребує на 100% більше енергоресурсів за рік, ніж наявна. При цьому постає питання розроблення монтажних рішень під світлові панелі Armstrong.

Варіант 2 зі світлодіодами найбільшої на сьогодні ефективності світловіддачі (170 лм/Вт) підвищує потреби в електроенергії порівняно з наявною системою лише на 17%, але забезпечує нормативну освітленість. При цьому маємо гіршу, але ще комфортну кольоропередачу.

Висновки. Для оцінювання комфортності освітлення достатню точність при широкій доступності надають датчики смартфонів. Але обов'язковою умовою є їхнє періодичне калібрування за професійними вимірювальними приладами. Великі площі скління не завжди надають переваги щодо освітлення приміщення. Природне освітлення більше опромінює вертикальні не робочі поверхні. Комп'ютерне моделювання освітлення рекомендовано для швидкої

1436 кВт год/рік

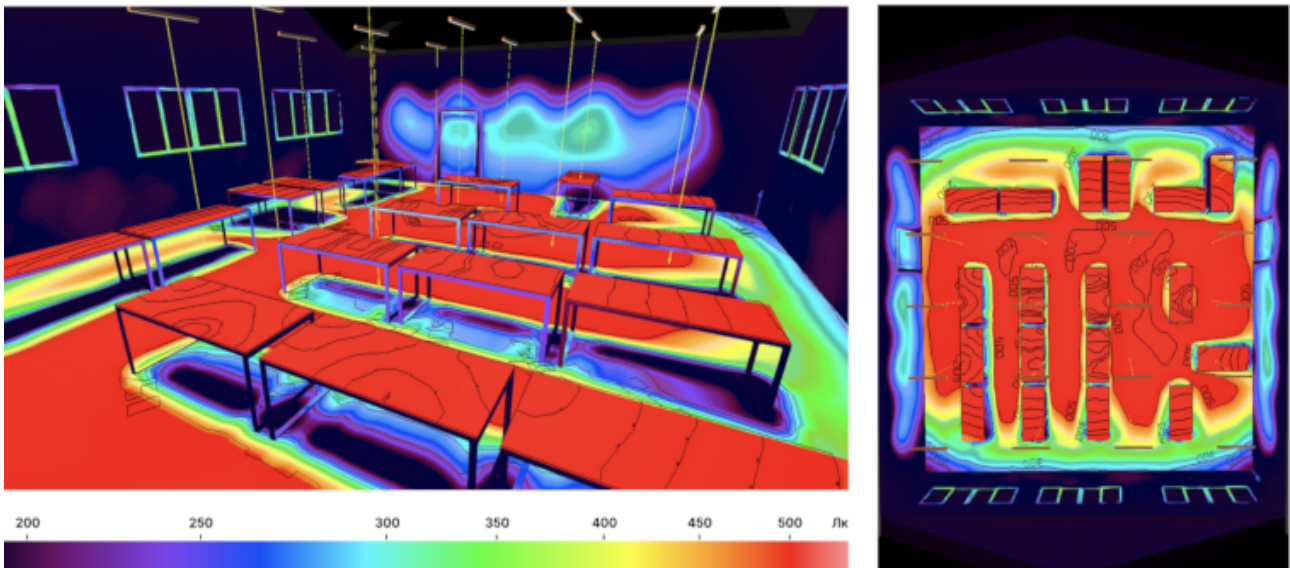


Рис. 6 Умовна кольорова візуалізація моделі освітлення приміщення **Варіант 2**

перевірки гіпотез та вибору кращих рішень освітлення. Більш якісна кольоропередача штучних джерел світла потребує значно більших витрат енергії, ніж більш енергоефективне освітлення, що має нижчу, але достатню кольоропередачу відповідно до норм для роботи в офісному приміщенні. Тому в даному питанні потрібен компроміс. Результати досліджень, спрямованих на визначення та підвищення рівня комфорту працівників, можуть бути використані в подальшому, як приклад для впровадження на схожих об'єктах.

References

1. Svitlo ta osvittlenia. Osvittlenia robochykh mist. Chastyna 1. Vnutrishni robochi mistia. (EN 12464-1) DSTU EN 12464-1 2016, State Enterprise "UkrNDNC", 2018, (in Ukrainian)
2. Pryrodne i shtuchne osvittlenia. DBN V.2.5-28:2018, Ministry of the Region of Ukraine, 2018 (in Ukrainian)
3. Xicato Inc. "Understanding Color Fidelity" XICATO, 2017 - <https://www.xicato.com/wp-content/themes/xicato/documentuploads/WP%20Understanding%20Fidelity%20print.pdf> Accessed 7 November 2023.
4. Jose-Maria Gutierrez-Martinez, Ana Castillo-Martinez, Jose-Amelio Medina-Merodio, Juan Aguado-Delgado and Jose-Javier Martinez-Herraiz. "Smartphones as a Light Measurement Tool: Case of Study" MDPI, 14 June 2017. <https://doi.org/10.3390/app7060616> Accessed 7 November 2023.
5. Rik Spieringhs. "The Unified Glare Rating (UGR)" Light & Lighting Blog, March 27, 2023, <https://rikspieringhs.nl/UnifiedGlareRating.html> Accessed 7 November 2023
6. Svitylnyky zi svitlodiodnymy dzherelamy svitla. Zahalni tekhnichni umovy. DSTU 8546:2015, State Enterprise "UkrNDNC" 2017. (in Ukrainian)

UDC 628.9

Student., **Oleksandr Demydov**,
22249-eeb.demydov@365.pdaba.edu.ua, ORCID: 0009-0008-4061-0010,
Postgraduate. **Leonid Kosenko**,
kosenko.leonid@365.pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8841-8318,
Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. **Olena Koval**
koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7805-6811,
Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. **Euhennii Yurchenko**,
yel@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9356-3261,
Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture

RESEARCH AND SIMULATION OF AN OFFICE LIGHTING

Abstract. *This research thoroughly examines the evaluation and optimization methods of office lighting aimed at improving energy efficiency and the working environment through the implementation of advanced lighting technologies. Including a comprehensive technical survey of existing lighting conditions, the development of scientifically substantiated recommendations takes into account regulatory requirements and contemporary practices in the field of lighting technology. An analysis of lighting efficiency, selection of optimal light sources, calculation of their placement for maximum efficiency, and assessment of the impact on energy savings are performed, with the goal of achieving better working conditions and reducing energy consumption. The study includes the following steps: illuminance as a critical factor affecting employee productivity and comfort; technical survey of the lighting system in the office space; methodology for conducting the technical survey – measurements of illuminance in different areas of the space using a lux meter; assesment of the need for luminous flux according to norms and standards for office spaces; selection of the type and power of LED lamps for the new lighting system; calculation of the number and placement of LED lamps to provide the necessary level of illuminance in the automated system DIALux Evo Pro; assessment of the expected results in the context of energy savings and improvement of working conditions; calculation of energy expenditures for the new lighting system; potential impact of the research results on energy management and energy audit in the construction sector. The research conclusions suggest strategies for the implementation of an innovative lighting system, which leads to the optimization of energy consumption and significant improvement of lighting quality. These strategies are expected not only to improve the working environment but also to lead to substantial energy resource savings in offices, thereby promoting ecological sustainability and financial efficiency.*

Keywords: *insolation, illuminance, energy efficiency, occupational safety, modernization, research.*

УДК 662.767.2

доцент Олег Березюк,
[berezukoleg@i.ua](mailto:berezyukoleg@i.ua), ORCID:0000-0002-2747-2978,
доцент Михайло Лемешев,
mlemeshev@i.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378
Вінницький національний технічний університет

РЕГРЕСІЙНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИНАМІКИ ЗРОСТАННЯ КІЛЬКОСТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК В УКРАЇНІ

Анотація. Глобальна екологічна криза змушує країни світу для енергозабезпечення населення впроваджувати і застосовувати нові альтернативні засоби вироблення енергії, зокрема методи видобування і перероблення біогазу. Тому визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок, є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок з метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором раціонального виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції. Регресія проводилася на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір. Отримано адекватну регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок. Побудовано графічну залежність, що описує динаміку збільшення кількості біогазових установок та дозволяє наочно проілюструвати дану динаміку та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними даними. Встановлено, що збільшення кількості біогазових установок в Україні протягом

2012-2019 рр. зростала за гіперболічною залежністю.

Ключові слова: відновлюване джерело енергії, біогаз, біогазова установка, динаміка, регресійний аналіз, регресійна залежність, математичне моделювання.

Вступ. Глобальна екологічна криза змушує країни світу для енергозабезпечення населення впроваджувати і застосовувати нові альтернативні засоби вироблення енергії, зокрема методи видобування і перероблення біогазу (БГ) [1]. Відповідно до даних, наведених у роботі [2], у світі експлуатується 481 система збирання БГ із загальним видобутком цих систем 5,15 млрд. м³ газу на рік. З них 175 установок припадає на країни ЄС, 264 – знаходяться в Америці (244 – в США), по 4 – в Австралії та Азії, 2 – в Африці. Але лише близько 25-50 % зібраного БГ знаходить комерційне використання, решта спалюється у факелах. Глобальна емісія БГ в атмосферу є важливим фактором зміни клімату Землі. Для отримання БГ найбільш ефективними є такі види сировини: відходи з ферм, сільськогосподарських підприємств, стічних вод, тверді побутові відходи (ТПВ) зі сміттєзвалищ і полігонів [1]. Головною складовою БГ є метан CH₄, емісія якого з територій захоронення ТПВ становить від 1,5 до 70 млн. т/рік [3, 4]. 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 [2]. 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 визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок, 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. У статті [1] зазначено, що будівництво біогазових установок є кроком до економіки замкненого циклу, спрямованої на впровадження відновлюваних джерел енергії, скорочення викидів парникових газів тощо, а також проведено техніко-економічне

обґрунтування ефективності будівництва біогазових установок. У роботі [5] проведено аналіз європейського досвіду виробництва БГ з відходів агропромислового комплексу. Зазначено, що формування ефективних методів поводження з сільськогосподарськими відходами та перетворення їх на енергію біомаси, доступну для людей, може не тільки пом'якшити поточну глобальну енергетичну кризу, але й покращити середовище сільськогосподарського виробництва, ефективно захистити навколишнє середовище та водночас робить значний внесок у скорочення викидів вуглецю. Також визначено, що розвиток виробництва БГ в Україні має орієнтуватися на найбільш ефективні практики країн Європи, враховувати реалії військового часу та передбачати:

- розвиток державно-приватного партнерства в сфері виробництва БГ через систему компенсації вартості обладнання для біогазових установок що вироблено в Україні в обсязі 60% вартості;
- встановлення квот на використання біометану в обсязі 10% від споживання промисловими підприємствами;
- встановлення компенсації 40% вартості будівництва когенераційних установок, що працюватимуть на БГ;
- компенсація вартості купівлі малих біогазових установок для особистих селянських господарств за рахунок коштів, що спрямовувалися на субсидування;
- звільнення від податкового навантаження підприємств, що вироблятимуть БГ з відходів основного виробництва.

У матеріалах робіт [6-8] наведено склад і фізико-хімічні властивості БГ, що утворюється в місцях захоронення ТПВ [9-15]. Виробництво БГ на кожному з полігонів може досягати 350...2400 м³/год [8], що дозволить значно покращити екологічну ситуацію в Україні, запобігши виділенню парникових газів в обсязі 16 млн. т у СО₂-еквіваленті, а також токсичних речовин. У статті [16] опубліковано склад біогазу, отриманого при анаеробному розкладанні ТПВ для різних співвідношень композиційних сумішей ТПВ-компост та їхньої відносної вологості.

Перспективи та досвід видобування БГ в місцях захоронення ТПВ детально описано в роботах [17-19], зокрема в статті [19] описано досвід впровадження біогазових установок в Литві, а в статтях [20, 21] розглянуті особливості утворення БГ, що дозволяють оптимізувати цей процес, що, своєю чергою, відкриває широкі можливості його використання у створенні екологічно чистих, відновлюваних джерел енергії. Вироблений БГ збирається за допомогою відповідного технічного обладнання і використовується такими способами:

- спалюється безпосередньо на блоковій теплоелектроцентралі (ТЕЦ) для

електро- і теплопостачання

- збагачується до біометану (очищеного БГ) і подається в наявну газотранспортну мережу
- спалюється як пальне в автомобілях на природному газі.

Застосування БГ у децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. Суттєвою перевагою виробництва БГ є використання поновлюваних джерел енергії, в тому числі ТПВ, вихід БГ з органічної фракції яких в середньому складає 123 Нм³/т субстрату. Широкий і постійно доступний спектр органічних речовин уможливорює постійне й безперервне виробництво БГ та сприяє економії викопних енергоносіїв [22]. Нижня теплотворна здатність звалищного БГ становить 16...18 Дж/Нм³ [23], а верхня – 20...25 МДж/Нм³ [8]. Авторами роботи [24] розглянуто методи використання біомаси для виробництва теплової енергії, перспективні конструкції газогенераторних установок, а також способи очищення генераторного газу від домішок. У роботі [25] описано фази розкладання ТПВ, 80% яких є анаеробними, а також визначено фактори, що впливають на процес біодеструкції відходів.

Автори статті [26] наводять огляд технологій видобутку і використання БГ на звалищах і полігонах ТПВ, економічних та екологічних аспектів технологій, а також статистичні дані щодо потенціалу БГ у різних країнах світу. У роботі [27] наведено математичну модель прогнозування питомого об'єму видобування БГ у вигляді квадратичної регресії із ефектами взаємодій 1-го порядку. У статті [28] опублікована математична модель прогнозування питомого потенціалу БГ, на основі якої отримано залежність ефективності видобування БГ від основних параметрів впливу [29], удосконалення якої відображено в статті [30].

У роботі [31] досліджено вплив характеристик ТПВ на обсяги, динаміку утворення, склад та потенціал енергетичного використання БГ з полігонів ТПВ. Авторами статті [32] проведено аналіз способів утилізації видобутого БГ, а в роботі [33] наведено математичну модель поширеності цих способів. У роботі [34] визначено регресійні залежності, які описують динаміку збільшення кількості біогазових установок лише на полігонах ТПВ в Німеччині та в Україні.

Таким чином, аналіз літературних джерел е виявив конкретних математичних залежностей для збільшення загальної кількості біогазових установок в Україні.

Формулювання цілей статті. Ціль статті – визначення регресійної залежності, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок з

метою збільшення поширеності використання поновлюваних джерел енергії, заощадження викопних енергоносіїв та одночасного зменшення інтенсивності забруднення навколишнього середовища.

Основна частина. У табл. 1 показана динаміка збільшення кількості біогазових установок в Україні [1]. На основі даних табл. 1 планувалось отримати парну регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні. Оскільки аргументом регресійних залежностей є рік, порядок значень якого на три порядки перевищує порядок ширини діапазону його зміни, то з метою підвищення точності регресійної залежності пропонується за початок координат прийняти рік, який передує початку досліджуваного діапазону ($x = t - 2011$).

Таблиця 1. Кількість біогазових установок в Україні в різні роки [1]

Рік	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Кількість біогазових установок в Україні, од.	7	9	10	12	13	21	33	45

Регресія проводилася на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [35].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із 16 найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

За результатами регресійного аналізу на основі даних табл. 1, як найбільш, адекватні остаточно прийнято таку регресійну залежність для кількості біогазових установок в Україні

$$n_{BGU} = \frac{1}{0,1524 - 0,01681(t - 2011)}, \quad (1)$$

де t – рік.

Формула (1) добре описує (рис. 1) дані табл. 1, які описують динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні.

Таблиця 2. Результати регресійного аналізу динаміки збільшення кількості біогазових установок в Україні

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + b \cdot x$	0,90377	9	$y = a \cdot x^b$	0,88064
2	$y = 1 / (a + b \cdot x)$	0,98980	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,76978
3	$y = a + b / x$	0,59883	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,76978
4	$y = x / (a + b \cdot x)$	0,07178	12	$y = a / (b + x)$	0,98979
5	$y = a \cdot b^x$	0,96997	13	$y = a \cdot x / (b + x)$	0,86840
6	$y = a \cdot e^{b \cdot x}$	0,96997	14	$y = a \cdot e^{b/x}$	0,73502
7	$y = a \cdot 10^{b \cdot x}$	0,96997	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,73502
8	$y = 1 / (a + b \cdot e^{-x})$	0,80895	16	$y = a + b \cdot x^n$	0,97001

Примітка. Сірим кольором виділено найкращу збіжність

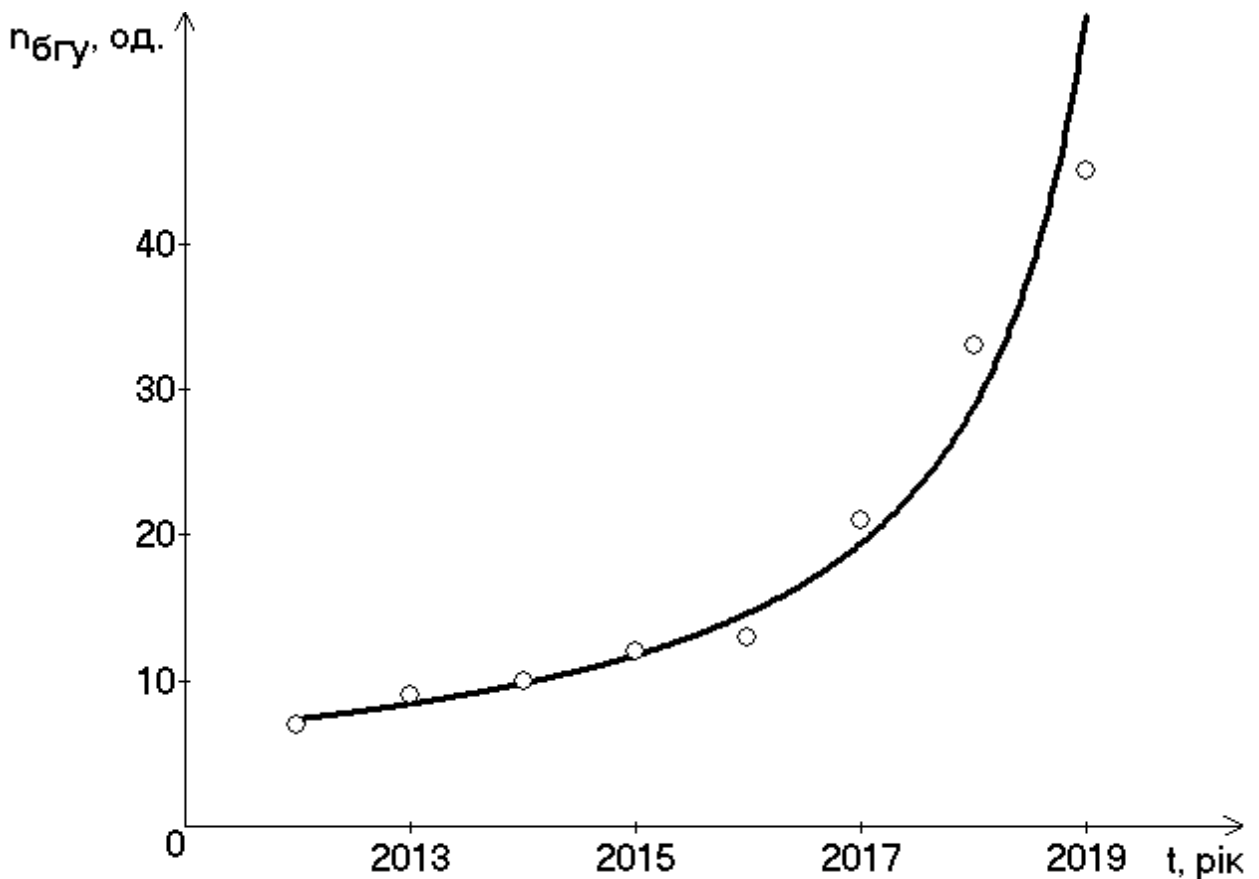


Рис. 1. Залежності, які описують динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні протягом 2012-2019 рр.:

○ – фактична, — – апроксимаційна

Порівняння фактичних та апроксимаційних даних показало, що теоретична динаміка збільшення кількості біогазових установок в Україні, розрахована за допомогою рівняння регресії (1), несуттєво відрізняється від даних, наведених в роботі [1]. Це підтверджує визначену раніше достатню точність отриманої залежності.

Висновки. Визначено регресійну залежність, яка описує динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні і може бути використана під час прогнозування кількості таких установок. Побудовано графічні залежності, що описують динаміку збільшення кількості біогазових установок в Україні та дозволяють наочно проілюструвати дану динаміку та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними. Коефіцієнт кореляції R досягає 0,98980. Встановлено, що збільшення кількості біогазових установок в Україні протягом 2012-2019 рр. зростала за гіперболічною залежністю.

Перспективи подальших досліджень. Визначення залежності теплотворної здатності біогазу від основних факторів впливу вимагає проведення додаткових досліджень.

References

1. Sakun L. M., Riznichenko L. V., Vielkin B. O. "Perspektyvy rozvytku rynku biohazu v Ukraini ta za kordonom." *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*, 2020, no. 1 (37), pp. 160-170. (in Ukrainian)
2. Isidorov V. A. *Organichna khimiia atmosfery*. Khimiia, 1992. (in Ukrainian)
3. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia "Prohramy utylizatsii zvalyshchnoho metanu v Luhanskii oblasti za dopomohoiu mekhanizmiv Kitskoho protokolu"*. Luhansk, 2008. (in Ukrainian)
4. Minko O. I., Lifshits A. B. "Ekologicheskii i geokhimicheskie kharakteristiki svalok tverdykh bytovykh otkhodov." *Ekologicheskaiia khimiia*, no. 2, 1992, pp. 37-47. (in Russian)
5. Kolomiets T. V. "Analiz yevropeiskoho dosvidu vyrobnytstva biohazu z vidkhodiv APK." *Ekonomika ta suspilstvo*, 2024, no. 60, 9 p. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-46> (in Ukrainian)
6. Krasnianskii M. E., Belgasem E. "Ekologicheskii ugrozy svalok TBO." *Tverdye bytovykh otkhody*, no. 5, 2005, 12 p. (in Russian)
7. Ratushniak H. S., Dzhedzhula V. V. *Enerhozberezhennia v systemakh biokonversii*. Navchalnyi posibnyk. VNTU, 2006. (in Ukrainian)
8. 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. (in Russian)
9. Kazachiner O., Boychuk Y., Halii A. *Theoretical foundations of pedagogy and*

education. International Science Group, 2022.

10. Korniylo I., Gnyp O. Scientific foundations in research in Engineering. Primedia eLaunch, 2022.

11. Hladyshch D., Hnat H. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture. International Science Group, 2023.

12. Azarenkov V. Modern teaching methods in pedagogy and philology. Primedia eLaunch, 2023.

13. Kazachiner O., Boychuk Y. Theoretical and scientific foundations of pedagogy and education. International Science Group, 2022.

14. Khrebtii H. Innovative ways of improving medicine, psychology and biology. Primedia eLaunch, 2023.

15. Alieva M. Conceptual options for the development and improvement of medical science and psychology. International Science Group, 2023.

16. Dzhamalova G. A. "Intensifikatsiia anaerobnogo razlozheniia modelnykh obraztsov tverdykh bytovykh otkhodov v bioreaktorakh." *Izvestiia SPbGTI(TU)*, no. 23, 2014, pp. 84-86. (in Russian)

17. Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Matveev Yu. B. "Perspektivy proizvodstva i ispolzovaniia biometana v Ukraine." *Analiticheskaia zapiska BAU. Bioenergeticheskaia asociatsiia Ukrainy*, no. 11, 2014, 43 p. (in Russian)

18. Masleeva O. V., Pachurin G. V. "Ekologicheskaia i ekonomicheskaia tselesoobraznost ispolzovaniia biotopliva." *Fundamentalnye issledovaniia*, no. 6, 2012, pp. 139-144. (in Russian)

19. Savickas Yu. Yu. "Opyt ekspluatatsii biogazovykh ustanovok pri anaerobnoi obrabotke organicheskikh otkhodov." *Promyshlennaia teplotehnika*, vol. 23. no. 4-5. 2001. pp. 128-131. (in Russian)

20. Bespalov V. I., Adamian R. G. "Analiz uslovii obrazovaniia biogaza na poligone po zakhoroneniuu tverdykh otkhodov potrebleniia." *Inzhenernyi vestnik Dona*, no. 25.2 (25), 2013. (in Russian)

21. Sheina O. A., Sysoev V. A. "Biokhimiia protsessa proizvodstva biogaza kak alternativnogo istochnika energii." *Vestnik TGU*, vol. 14, no. 1, 2009, pp. 73-76. (in Russian)

22. Shults R. *Vyrobnytstvo i vykorystannia biohazu v Ukraini*. Biznes-tsentr «Ievraziia», 2012. (in Ukrainian)

23. Shmarin S. L. *Prohnozuvannia vykydiv parnykovykh haziv z mist zakhoronennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini*. Diss. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho", 2018. (in Ukrainian)

24. 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. (in Ukrainian)

25. Hodovska T. B., Feshchenko V. P. "Kryterii indykatoriv vplyvu na

ahroekosystemy polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv m. Zhytomyr.” Visnyk ZhNAEU: naukovo-teoretychnyi zbirnyk, vol. 1, no. 1 (28), 2011, pp. 400-407. (in Ukrainian)

26. 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 resursoberezenie, no. 4, 1999, pp. 6-14. (in Russian)

27. Bereziuk O. V. “Vyivlennia parametriv vplyvu na pytomyi obiem vydobuvannia zvalyshchnoho hazu.” Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, no. 3, 2012, pp. 20-23. (in Ukrainian)

28. Bereziuk O. V. “Rozrobka matematychnoi modeli prohnozuvannia pytomoho potentsialu zvalyshchnoho hazu.” Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, no. 2, 2013, pp. 39-42. (in Ukrainian)

29. 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. (in Ukrainian)

30. Bereziuk O. V., Lemeshev M. S. "Udoskonalennia matematychnoi modeli efektyvnosti vydobuvannia zvalyshchnoho hazu." Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia, no. 44, 2023, pp. 10-16. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.12-16> (in Ukrainian)

31. Pukhniuk O. Yu. Utvorennia biohazu na polihonakh tverdykh pobutovykh vidkhodiv Ukrainy ta otsinka potentsialu yoho enerhetychnoho vykorystannia: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: 05.14.08. Kyiv, 2013, 26 p. (in Ukrainian)

32. Kuris Yu. V., Tkachenko S. Y., Semenenko N. V. "Sposoby utylizatsii biohazu." Enerhosberezenie. Enerhetyka. Enerhoaudyt, no. 7 (77), 2010, pp. 20-30. (in Ukrainian)

33. Bereziuk O. V. "Modeliuvannia poshyrenosti sposobiv utylizatsii zvalyshchnoho hazu dlia rozrobky obladnannia ta stratehii povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy." Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, no. 5, 2014, pp. 65-68. (in Ukrainian)

34. Bereziuk O. V., Kraievskyi V. O., Bereziuk L. L. "Svitovi tendentsii zmenshennia kilkosti smittiezvalyshch na prykladi SShA." Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 2020, no. 1, 6 p. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2020-1-8-13> (in Ukrainian)

35. Bereziuk O. V. "Kompiuterna prohrama "Rehresiinyi analiz" ("RegAnaliz")." Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir no 49486, K.: Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy, Data reiestratsii: 03.06.2013. (in Ukrainian)

UDC 662.767.2

Associate Professor **Oleh Bereziuk**,
berezyukoleg@i.ua, ORCID:0000-0002-2747-2978,
Associate Professor **Mykhailo Lemeshev**,
mlemeshev@i.ua, ORCID:0000-0002-6083-0378
Vinnytsia National Technical University

REGRESSION DEPENDENCE OF THE NUMBER GROWTH DYNAMICS OF THE BIOGAS PLANTS IN UKRAINE

Abstract. *The global environmental crisis forces the countries of the world to introduce and use new alternative means of energy production, in particular methods of extraction and processing of biogas to provide energy to the population. Therefore, the determination of the regression dependence, which describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and can be used when forecasting the number of such plants, is an urgent scientific and technical task. The purpose of the research is to determine the regression dependence, which describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and can be used when forecasting the number of such plants, with the aim of increasing the prevalence of the use of renewable energy sources, saving fossil energy sources and simultaneously reducing the intensity of environmental pollution. During the research, the method of regression analysis of the results of one-factor experiments and other paired dependencies was used with the selection of a rational type of function from the sixteen most common options according to the criterion of the maximum value of the correlation coefficient. Regression was carried out on the basis of linearizing transformations, which allow reducing the non-linear dependence to a linear one. The coefficients of the regression equations were determined by the method of least squares using the developed computer program "RegAnalyz", which is protected by a certificate of copyright registration for the work. An adequate regression relationship was obtained, which describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and can be used when forecasting the number of such plants. A graphical dependence was built that describes the dynamics of the increase in the number of biogas plants and allows to visually illustrate this dynamic and show sufficient convergence of theoretical results with actual data. It was established that the increase in the number of biogas plants in Ukraine during 2012-2019 grew according to a hyperbolic dependence.*

Keywords: *renewable energy source, biogas, biogas plant, dynamics, regression analysis, regression dependence, mathematical modelling.*

УДК 697.329

старший викладач **Степан Мисак**,
stepan.y.mysak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-2064-7015,
професор **Степан Шаповал**,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930,
доцентка **Галина Матіко**,
halyna.f.matiko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5482-2307
Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА

***Анотація.** Відповідно до зобов'язань, взятих на себе в рамках Паризької кліматичної угоди, наукова спільнота ініціювала стратегічне нарощування частки відновлюваних джерел енергії з одночасним поетапним скороченням залежності від традиційних вуглецевих палив. Пріоритет надається прискоренню розвитку фотовольтаїчної галузі, яка демонструє постійне нарощування потужностей протягом останніх десятиліть. Відповідно до енергетичних та кліматичних стратегій Європейського Союзу, планується суттєве збільшення обсягів генерації енергії за рахунок сонячних джерел. Тому стаття присвячена розробленню системи сонячного теплопостачання на основі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора із вдосконаленою конструкцією та аналізу основних характеристик її роботи із застосуванням комп'ютерного моделювання. Застосовуючи програмний комплекс SolidWorks, автори розробили комп'ютерну 3D модель запропонованої гібридної системи з сонячним колектором. Проаналізовано зміну температури теплоносія у гібридному теплому фотоелектричному геліоколекторі (ГТФГК) при сталому сонячному випромінюванні. Досліджено також зміну температури теплоносія в теплому акумуляторі системи. Результати моделювання теплових процесів виявили ключові закономірності підвищення температури протягом комп'ютерного експерименту, як у ГТФГК, так і в теплому акумуляторі. Проаналізовано зміну миттєвої питомої теплової потужності розробленого геліоколектора, оцінено його середній коефіцієнт корисної дії. Визначено тенденції зміни теплової ефективності розробленої системи теплопостачання впродовж комп'ютерного експерименту.*

Ключові слова: енергопостачання; теплопостачання; відновлювальні джерела енергії; фотоелектричний геліоколектор, тепловий акумулятор.

Вступ. Ескалація цін на первинні енергоресурси, конфлікти, що виникають на цьому ґрунті, а також несприятлива екологічна ситуація у світі актуалізують потребу в широкому застосуванні альтернативних джерел енергії. У цьому контексті стає важливим постійне вдосконалення наявних технологій та розроблення інноваційних рішень для ефективного використання різноманітних нетрадиційних джерел енергії, таких як енергія сонця, вітру, біомаси, біопалива та відходів, геотермальної енергії тощо [1, 2].

Одним із перспективних екологічно чистих джерел енергії є енергія сонця. Перевагами сонячної енергії є те, що вона доступна практично в будь-якому місці, де є сонячне світло, не генерує шкідливих викидів, не вичерпається впродовж мільйонів років. Сонячні системи мають порівняно невеликий термін окупності 5...7 років та можуть використовуватися для опалення, гарячого водопостачання, кондиціонування повітря та інших потреб. Обсяги застосування сонячної енергії значно зросли впродовж останніх десятиліть. Очікується подальше подвоєння впровадження таких систем до 2030 року [1-5].

На сучасному етапі розвитку технологій існують численні пристрої для перетворення сонячної енергії на теплову або електричну. Особливої уваги заслуговують гібридні сонячні системи, які дозволяють одночасно з одного джерела отримувати теплову й електричну енергію [6-10].

Аналіз літературних джерел. На сьогодні розроблено багато систем сонячного енергопостачання, які відрізняються конструкцією та ефективністю [6-12], методами тестування та техніко-економічного аналізу [7, 13, 14]. У [15] наведено огляд методологій проектування систем зберігання теплової енергії та факторів, які слід враховувати на різних ієрархічних рівнях для концентрації сонячних електростанцій. У [16] було проведено оцінку й оптимізацію продуктивності та ефективності гібридного плоского сонячного колектора, що поєднується з фазозмінним матеріалом і радіатором. У [17, 18] проаналізовано ефективність сонячної покрівлі в системі теплопостачання з використанням гравітації. Також було запропоновано нові конструкції сонячних колекторів з верхньою частиною з профнастилу для покриття будівель з метою підвищення їх ефективності та тривалості служби [18]. Крім того, у [19] був проведений теоретичний та експериментальний аналіз геліоустановки як складової енергоефективного будинку. У роботі [20] було здійснено аналіз енергетичних характеристик системи комбінованого теплопостачання з використанням геліоколекторів, які вбудовано в захисні покриття будівель, що можливе за використання нових ефективних матеріалів [21].

Велика увага також приділяється питанню підвищення енергоефективності сонячних колекторів [7, 10, 16, 22]. У [23] проведено дослідження різних типів сонячних панелей та їхньої ефективності за допомогою композиційних

фазозмінних матеріалів. У [10] був проведений експериментальний аналіз різних типів сонячних колекторів з метою підвищення їх ефективності. Дослідження [16] пропонує нову методологію для оцінювання оптичної ефективності сонячних колекторів, яку рекомендують застосовувати при проєктуванні сучасних геліосистем.

Однак, незважаючи на переваги, застосування теплових фотоелектричних сонячних систем обмежене недоліками, зокрема нерівномірне охолодження, низька ефективність, висока вартість та складність інтегрування з наявними даховими системами, а також потреба в більшому просторі для окремих систем [8, 9]. Для зменшення недоліків і підвищення ефективності систем сонячного енергопостачання автори пропонують вдосконалити конструкцію гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора та використовувати програмні комплекси для моделювання його роботи.

Таким чином, **метою цього дослідження** є розроблення системи теплопостачання з гібридним фотоелектричним геліоколектором з удосконаленою конструкцією та аналіз основних характеристик її роботи із застосуванням комп'ютерного моделювання. Основні завдання дослідження охоплюють:

- аналіз наявних технологій оптимізації сонячних колекторів для одночасного отримання теплоти та електроенергії;
- удосконалення конструкції системи теплопостачання з гібридним геліоколектором;
- створення комп'ютерної 3D моделі запропонованої гібридної системи та аналіз її теплових характеристик.

Об'єктом дослідження є система теплопостачання з гібридним тепловим фотоелектричним колектором, а предметом дослідження є теплові процеси, що відбуваються в цій системі.

Методи досліджень. Для планування багатofакторного експерименту та обробки отриманих даних використовують методи комп'ютерного моделювання, які реалізовані за допомогою програмного комплексу для моделювання та комп'ютерних досліджень SolidWorks. Отримані результати узгоджуються із сучасними науковими знаннями. Висновки та рекомендації, сформульовані на основі комп'ютерного моделювання, підтверджуються через аналіз, узагальнення та систематизацію.

Основна частина. У роботі запропонована вдосконалена система теплопостачання на основі гібридного сонячного колектора, яка має два основні компоненти: тепловий і фотоелектричний, які розташовані послідовно (рис. 1). Фотоелектрична частина обладнана кремнієвими фотоелементами, а тепла частина має трубопроводи для передачі теплоносія, виготовлені з міді і

концентратори параболічної форми з алюмінієвим поліруванням. Тепловий акумулятор складається зі сталевого корпусу, ізоляції та виконаний по типу «без теплообмінника». Відсутність теплообмінника дозволяє тепловій системі працювати в більш сприятливому режимі, усуває його вплив на характеристики теплового акумулятора та дає змогу уникнути спотворення результатів експерименту, спричинених додатковими тепловими потоками і втратами.

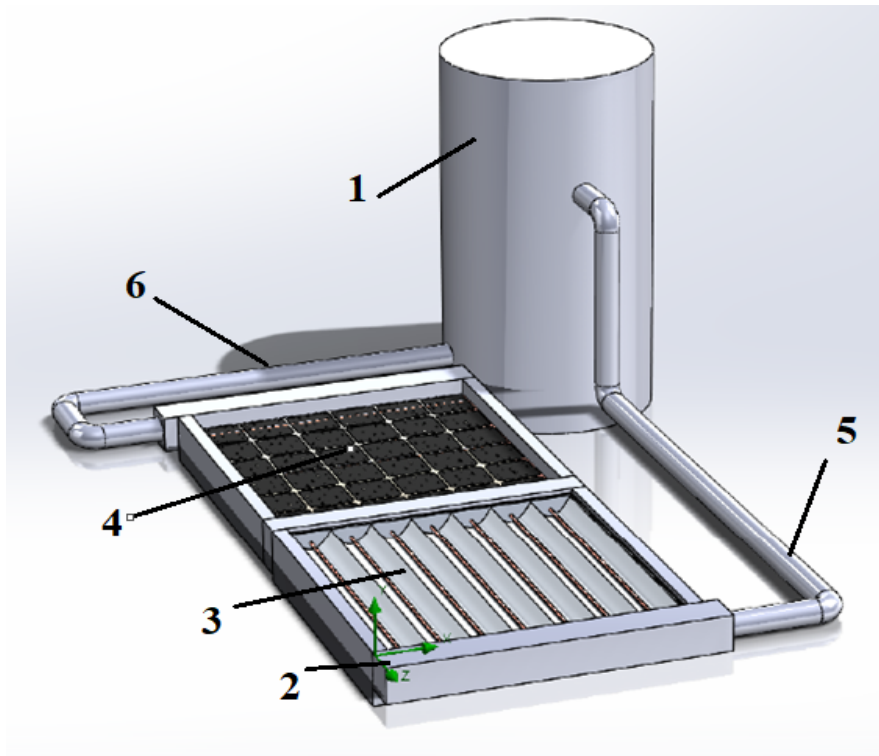


Рис. 1. Комп'ютерна модель запропонованої конструкції гібридного фотоелектричного геліоколектора із тепловим акумулятором: 1– тепловий акумулятор (ТА); 2 – розподільча гребінка; 3 – тепла частина гібридного теплофотоелектричного геліоколектора (ГТФГК);

4 – теплофотоелектрична частина ГТФГК; 5 – трубопровід руху нагрітого теплоносія від ГТФГК у ТА; 6 – трубопровід руху теплоносія від ТА до ГТФГК

З метою аналізу роботи запропонованої системи теплопостачання було розроблено комп'ютерну 3D модель гібридного теплофотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) з теплоакумулятором (ТА) за допомогою програмного забезпечення для моделювання та візуалізації SolidWorks, яка наведена на рис. 1. Запропонована комп'ютерна 3D модель геліоколектора враховує особливості його конструкції, а саме послідовне розташування теплових і фотоелектричних елементів, відсутність прозорого покриття та теплообмінника в тепловому акумуляторі.

Комп'ютерне моделювання проводилося за таких умов:

- витрата рідини становила близько 30 г/с;
- діаметр внутрішніх труб – 25 мм;
- діаметр труб колектора – 10 мм;
- сонячне випромінювання з інтенсивністю 900 Вт/м² спрямовується під прямим кутом до поверхні колектора;
- температура навколишнього середовища та початкова температура елементів ГТФГК становить 15°C;
- потік рідини має ламінарний та турбулентний характер у співвідношенні 98% до 2%, відповідно;
- атмосферний тиск – 101325 Па;
- прискорення вільного падіння вздовж осі ординат – 9.81 м/с²;
- моделювання проводилося в режимі реального часу із загальною тривалістю комп'ютерного експерименту 5400 с (15 год);
- дані фіксувалися щосекунди.

Тривалість моделювання розраховано з умови досягнення стаціонарного стану системи, що є ключовим для аналізу її довгострокової теплової продуктивності.

З метою оцінювання теплової ефективності розробленого гібридного сонячного колектора авторами проведено аналіз результатів термодинамічної симуляції. З рис. 2 бачимо, що максимальні значення температури перевищують 48 °С. Це свідчить про інтенсивне теплосприйняття в області абсорбера із фотоелементами, що є позитивним аспектом з точки зору передачі теплоти. Проте це є негативним явищем для роботи фотопанелей – основних елементів геліоколектора – наприкінці комп'ютерного експерименту.

Крім того, зміна теплових характеристик геліоколектора за даними комп'ютерного моделювання відповідає рис. 3. Отримані результати показують, що при постійній температурі навколишнього повітря 15 °С, температурний профіль теплоносія в ГТФГК свідчить про інтенсивний теплообмін та ефективне поглинання сонячної радіації.

Зростання температури на виході з колектора від 15°C до 24°C за перші 10 хвилин моделювання відображає здатність системи до швидкого нагрівання. Такий результат є позитивним для початкового етапу роботи системи теплопостачання. Це відповідає 60 % збільшення температури теплоносія. Таким чином, маємо високу тепловіддачу абсорбційної поверхні колектора. Далі, протягом наступних 25 хвилин спостерігається стабілізація процесу теплопередачі, що свідчить про досягнення балансу між тепловиділенням фотоелектричних елементів та теплоабсорбцією теплоносія.

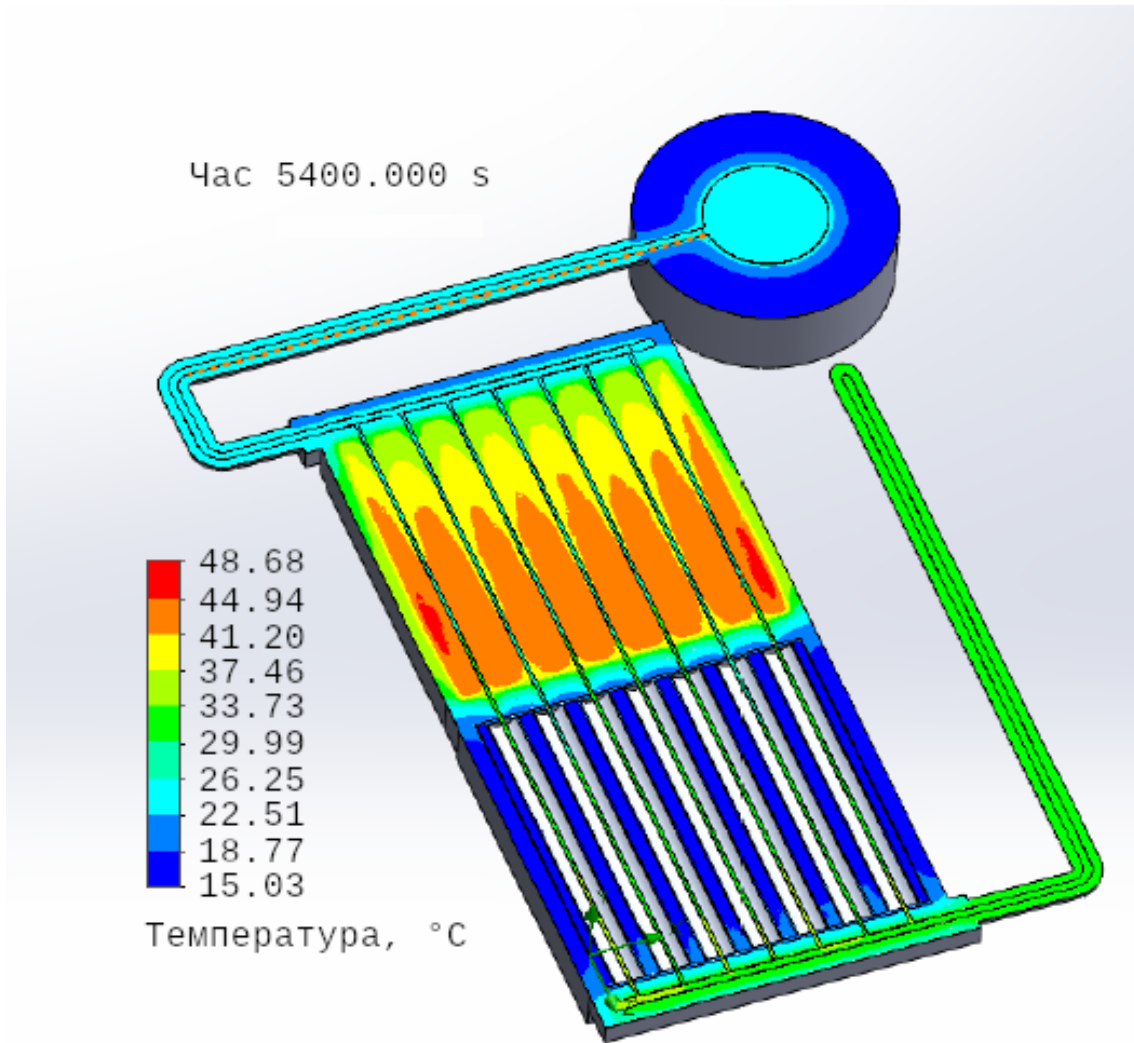


Рис. 2. Розподіл температур в досліджуваному гібридному геліоколекторі наприкінці комп'ютерного експерименту

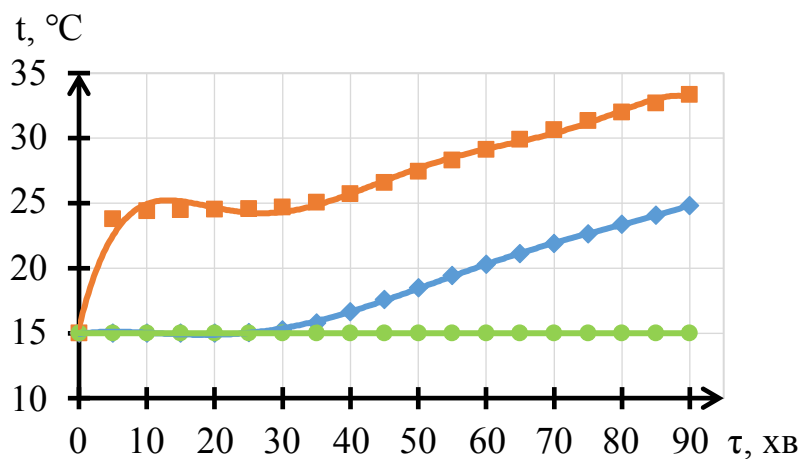


Рис. 3. Зміна температури теплоносія у трубопроводі на вході $t_{вх}, °C$ (◆) та на виході $t_{вих}, °C$ (■) з ГТФГК та температури навколишнього середовища $t_{н.с.}, °C$ (●)

Подальше зростання температури на виході до 33 °С, що становить 120 % від початкової температури, вказує на стабільну роботу системи та ефективний теплообмін протягом усього періоду сонячного опромінення.

З іншого боку, зростання температури теплоносія на вході в колектор, яке починається після 25 хвилин та досягає значення 24,8°С в кінці експерименту, свідчить про незначне затримання тепловіддачі в системі. Таке поступове зростання на 65,3 % може бути пов'язане із тепловою інерцією колектора або з акумуляцією теплоти в теплоносії, що циркулює по системі.

Відповідно до рис. 4, при протіканні теплоносія згори донизу теплообмінного апарата його температури у середньому шарі t_{TA_2} та у верхньому шарі t_{TA_3} відрізняються незначно. Досягається постійна різниця 1 °С після 40 хв експерименту. Це означає, що теплові процеси в системі теплопостачання із ГТФГК стабілізуються. Наприкінці комп'ютерного експерименту температури, відповідно, становлять 28,7 °С і 29,7 °С. Температура в нижньому шарі теплоносія в ТА t_{TA_1} за рахунок інерції прогрівання починає зростати через 25 хв проведення замірів і досягає кінцевого значення 25,3 °С. Середня температура теплоносія в ТА t_{TA_c} починає зростати після п'ятої хвилини і наприкінці моделювання становить 27,9 °С.

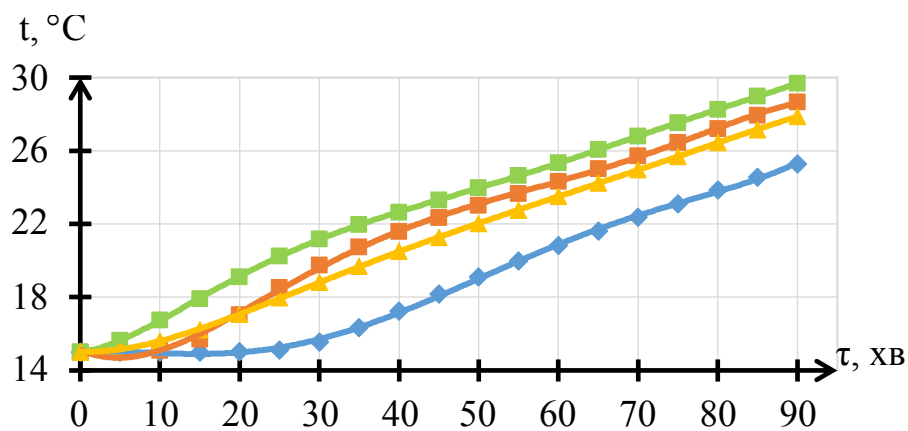


Рис. 4. Зміна температури теплоносія по висоті теплового акумулятора t_{TA} , °С: \blacklozenge – у нижньому шарі t_{TA_1} ; \blacksquare – у середньому шарі t_{TA_2} ; \blacksquare – у верхньому шарі t_{TA_3} ; \blacktriangle – середня t_{TA_c}

Наступним етапом було оцінювання ефективності роботи розробленої системи теплопостачання із ГТФГК, а саме розрахунок миттєвих значень питомої теплової потужності (рис. 5) та теплової ефективності (рис. 6) ГТФГК. З рис. 5 помітно, що через 10 хв від початку комп'ютерного експерименту миттєва питома теплова потужність ГТФГК $Q_{ГТФГК}$ стабілізується на рівні 590 Вт/м², далі поступово зменшується і наприкінці дослідження становить 537 Вт/м².

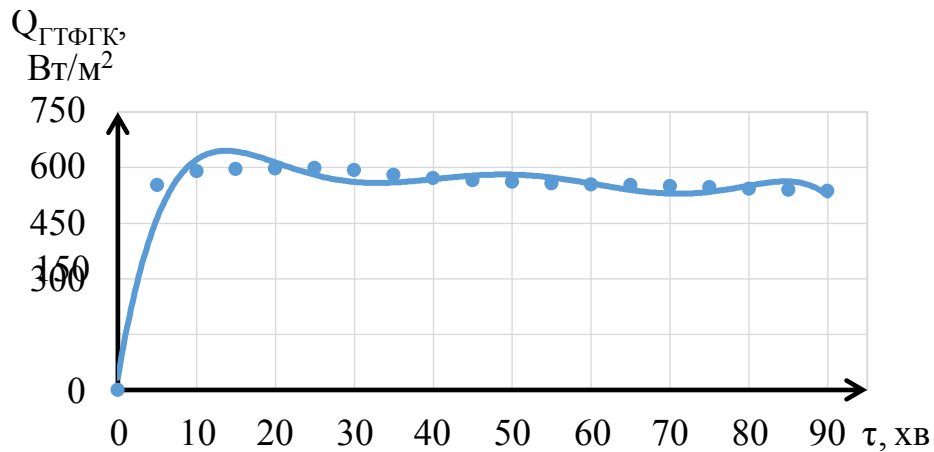


Рис. 5. Миттєва питома теплова потужність ГТФГК

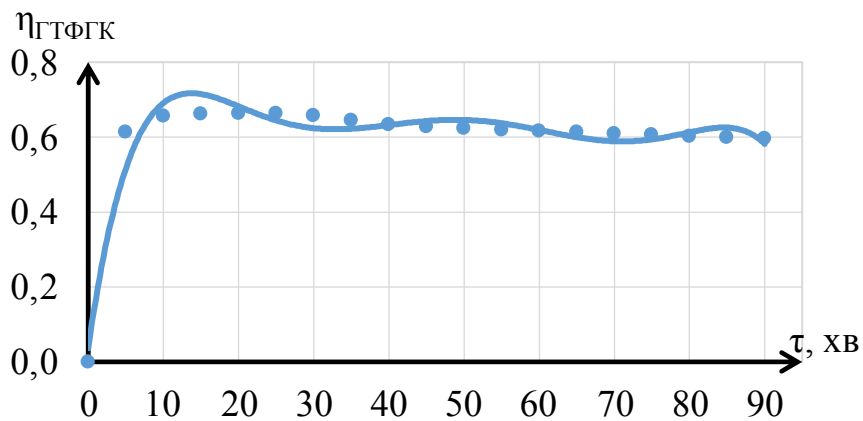


Рис. 6. Теплова ефективність ГТФГК

Теплова ефективність ГТФГК досягає свого максимального значення близько 0,66 % приблизно через 10-30 хв після початку експерименту. Після цього часу ефективність поступово знижується і до кінця експерименту досягає значення біля 0,6.

Такий змінний характер теплової ефективності може бути пов'язаний з різними факторами, що впливають на роботу системи. Це – теплові втрати через елементи системи, зміна температури джерела теплоти тощо. Аналіз впливових факторів може допомогти вдосконалити проектування та роботу таких систем теплопостачання для досягнення кращої теплової ефективності протягом тривалого періоду часу.

Висновки. Поступове зростання температури теплоносія в трубопроводі на вході та на виході геліоколектора під дією сонячної енергії, отримане в результаті комп'ютерного моделювання, свідчить про його ефективність в акумулюванні та передаванні теплоти. Зростання температур у верхньому та середньому шарах теплового акумулятора також показує здатність системи зберігати отриману енергію для подальшого використання. Отримані результати свідчать про потенціал використання гібридних сонячних систем у виробництві

теплової та електричної енергії та підтриманні сталого розвитку.

Новизна дослідження полягає в тому, що вдосконалено конструкцію гібридного теплофотоелектричного геліоеолектора, розроблено його 3D комп'ютерну модель та отримано основні теплові характеристики розробленої системи теплопостачання при сталому сонячному випромінюванні, що сприятиме в перспективі розробленню методики розрахунку таких систем теплопостачання з гібридними геліоколекторами.

Практичне значення виявляється у можливості впровадження досліджуваних систем на різноманітних побутових та промислових об'єктах з метою їх забезпечення електричною та тепловою енергією.

References

1. Paris Agreement. United Nations. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf. Accessed 06 March 2024.
2. Stec M., Grzebyk M. "Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union." *Energies*, vol. 15, 2022, pp.1-18. <https://doi.org/10.3390/en15218278>
3. Cantarero M.M.V. "Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries." *Energy Res. Social Sci.* vol. 70, 2020, pp.1-15. DOI:10.1016/j.erss.2020.101716
4. Shapoval, S., Mysak, S., Shapoval, P., Matiko, H. "Analysis of Current Use of Renewable and Alternative Energy Sources by European Countries." *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 438, 2024, pp. 381–391. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_38
5. Pluta Z. *Sloneczne instalacje energetyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007. (In Polish)
6. Gautam A., Saini R. "A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications." *Solar Energy*, vol. 207, 2020, pp. 937–956. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>
7. Algarni S. "Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink." *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 45, 2023, pp. 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892>
8. Hamdan M. A., Abdelhafez E., Ahmad R., Aboushi A. R. "Solar Thermal Hybrid Heating System." *Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*, December 2014, Beirut, Lebanon, 2014, pp.1-11.
9. Abdelhafez E. A., Hamdan M. A., and Al Aboushi A. R. "Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network." *Conference: 8th*

International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8), May 2016, Afyonkarahisar, Turkey, 2016, pp. 1-6.

10. Kareem M.W., Habib K., Pasha A.A., Irshad K., Afolabi L.O., Saha B.B. “Experimental study of multi-pass solar air thermal collector system assisted with sensible energy-storing matrix.” *Energy*, vol. 245, 2022, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123153>.

11. Duffie J.A. and Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Edition, Madison, New York; John Wiley & Sons, Hoboken, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>

12. Beckman W.A., Klein S.A., Duffie J.A. *A design procedure for solar heating systems*. New York: John Wiley & Sons, 1982.

13. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. “Comparison of solar collector testing methods – theory and practice.” *Processes*, vol. 8, 2020, pp. 1-29. <https://doi.org/10.3390/pr8111340>.

14. Hassan A., Nikbakht A. M., Fawzia S., Yarlagada P.K.D.V., Karim A. “Transient analysis and techno-economic assessment of thermal energy storage integrated with solar air heater for energy management in drying.” *Solar Energy*, vol. 264, 2023, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112043>

15. Kuravi S., Trahan J., Goswami D.Y., Rahman M.M., Stefanakos E.K. “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants.” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39(4), 2013, pp. 285-319. DOI:10.1016/j.pecs.2013.02.001

16. Francesconi M., Antonelli M., Desideri U. “Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power.” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 40, 2023, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>

17. Shapoval, S., Spodyniuk, N., Zhelykh, V., Shepichak, V., Shapoval, P. “Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation.” *Pollack Periodica*, vol. 16(1), 2021, pp. 132-137. <https://doi.org/10.1556/606.2020.00218>

18. Pona O.M., Voznyak O.T. “Efficiency of helio roofing in the gravity system of heat supply.” *Construction, materials science, mechanical engineering*, vol. 76, 2014, pp. 231-235. (In Ukrainian)

19. Shapoval S., Zhelykh V., Venhryn I., Kozak K., Krygul R. “Theoretical and experimental analysis of solar enclosure as part of energy-efficient house.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2(8-98), 2019, pp. 38–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160882>

20. Marushchak U., Sydor N., Braichenko S. and Hohol M. “Effect of Dry–Wet Cycles on Properties of High Strength Fiber-Reinforced Concrete.” *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 438, 2024, pp. 265-272. <https://doi.org/10.1007/978-3-031->

44955-0_27

21. Guminilovych R., Shapoval P., Yatchyshyn I., Shapoval S. “Modeling of chemical surface deposition (CSD) of CdS and CdSe semiconductor thin films.” *Chemistry and Chemical Technology*, vol. 9(3), 2015, pp. 287-292. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.287>

22. Aitola K., Sonai G. G., Markkanen M., Kaschuk J. J., Hou X., Miettunen K., Lund P. D. “Encapsulation of commercial and emerging solar cells with focus on perovskite solar cells.” *Solar Energy*, vol. 237, 2022, pp. 264-283. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.060>

23. Govindasamy D., Kumar A. “Experimental analysis of solar panel efficiency improvement with composite phase change materials.” *Renewable Energy*, vol. 212, 2023, pp. 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.028>

UDC 697.329

Seniour Lecturer **Stepan Mysak**,
stepan.y.mysak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-2064-7015,
Professor **Stepan Shapoval**,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930,
Associate Professor **Halyna Matiko**,
halyna.f.matiko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5482-2307
Lviv Polytechnic National University

ENERGY-EFFICIENT SOLAR HEAT SUPPLY SYSTEM BASED ON HYBRID PHOTOVOLTAIC COLLECTOR

Abstract. *Following the commitments made under the Paris Climate Agreement, the scientific community has initiated a strategic increase in the share of renewable energy sources while gradually reducing dependence on traditional carbon fuels. Priority is given to the acceleration of the development of the photovoltaic industry, which has shown a constant increase in capacity over the past decades. According to the energy and climate strategies of the European Union, a significant increase in the amount of energy generation due to solar sources is planned. Therefore, the article is devoted to the development of a solar heat supply system based on a hybrid thermal photovoltaic solar collector with an improved design and analysis of the main characteristics of its operation using computer modeling. The authors have developed a 3D computer model of the proposed hybrid system with a solar collector by using SolidWorks software. The change in the temperature of the heat carrier in the hybrid thermal photovoltaic solar collector under constant solar radiation was analyzed. The temperature change of the coolant in the thermal accumulator of the system was also investigated. The results of the simulation of thermal processes*

revealed the key regularities of the temperature increase during the computer experiment, both in the hybrid thermal photovoltaic solar collector and in the thermal accumulator. The change in the instantaneous specific heat capacity of the developed solar collector was analyzed, and its average efficiency was estimated. The trends of changes in the thermal efficiency of the developed heat supply system during the computer experiment were determined. The novelty of the study is that the design of the hybrid thermophotovoltaic solar collector has been improved, its 3D computer model has been developed, and the main thermal characteristics of the developed heat supply system with constant solar radiation have been obtained, which will contribute to the development of calculation methods for such heat supply systems with hybrid solar collectors in the future.

Keywords: energy supply; heat supply; renewable energy sources; photovoltaic solar collector, heat accumulator.

УДК 620.9

доцент **Павло Гламаздин**,
sib.kiev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2611-2687,
аспірант **Богдан Козячина**,
bohthankoziachyna@gmail.com, ORCID: 0009-0000-6972-3862,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ВРАХУВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ПРИ ПОБУДОВІ ГРАФІКА РОСАНДЕРА

***Анотація.** Важливим інструментом при розробленні джерел теплоти є графік тривалості теплових навантажень протягом опалювального періоду (графік Росандера). Побудова графіка Росандера неможлива без даних про тривалість стояння температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду. В роботі розкрито проблему відсутності актуальних температурних даних, необхідних для побудови графіка Росандера в чинних нормативах. Проведено аналіз попередніх досліджень, у яких визначено температурні дані з тривалістю стояння, а також обґрунтовано необхідність їх уточнення. Оброблено масиви погодинних температур зовнішнього повітря за двома погодними моделями, а також масив середньодобових температур, отриманих у результаті вимірювань з метеостанції для географічного розташування головного корпусу КНУБА. У результаті порівняльного аналізу виявлено ближчу до дійсності модель та розроблено на її основі актуальні дані щодо тривалості стояння температур зовнішнього повітря для міста Києва з кроком температур 1 °С. Проведено порівняння отриманих температурних даних з тими, що були визначені в попередніх дослідженнях, а також температурними даними, що містяться у скасованому нормативі. Побудовано криву багаторічного ходу середніх ковзких температур зовнішнього повітря зимових періодів 1973-2023 рр. і її поліноміальний тренд та проведено їх порівняння із кривою, що характеризує хід ковзких середніх п'ятирічних температур зимових періодів 1861-1970 рр.*

Ключові слова: кліматичні зміни; графік Росандера; тривалість стояння температур.

Вступ Кліматичні умови мають безпосередній вплив на проєктування та режими експлуатації більшості інженерних систем. Так само як кількість опадів впливає на проєктування систем водовідведення [1], інтенсивність сонячного випромінювання впливає на проєктування фотоелектричних систем та геліосистем [2], так і температура атмосферного повітря впливає на проєктування та показники енергетичної ефективності всіх елементів систем теплопостачання. Її мінливість значною мірою впливає на витрату теплоти та палива з дня в день та з року в рік. Динаміка цих змін визначається впливом

широкої групи геофізичних явищ, що складним чином взаємодіють між собою. Передбачити вплив та зміни цих явищ на сьогодні є дуже складною задачею [3].

Актуальність дослідження. Надзвичайно важливим інструментом при розробленні джерел теплоти, який дозволяє оцінювати зміну теплових навантажень споживачів та моделювати алгоритми роботи джерел теплоти з урахуванням мінливості температури зовнішнього повітря в географічних умовах об'єктів проектування, є графік витрати теплоти за опалювальний період (графік Росандера). Особливу цінність графік Росандера має при розробленні комбінованих джерел теплоти, що поєднують роботу відновлювальних та традиційних джерел теплоти. Адже побудова та інтегрування кривих теплової потужності джерел у складі комбінованого джерела теплоти на графіку Росандера дозволяє визначити ступінь їх участі в річному виробництві теплоти [4], що у свою чергу дає змогу наближено розрахувати термін окупності обладнання на стадії проектування та дозволяє точніше коригувати алгоритми роботи джерел теплоти за можливої зміни розташування точки бівалентності у майбутньому. Робота відновлювальних джерел теплоти порівняно з традиційними джерелами є ефективнішою та економічнішою лише за певних умов. Вартість такого обладнання, зазвичай, є значно вищою за вартість обладнання традиційних джерел теплоти. Тому можна зробити висновок про важливість побудови графіку при вирішенні описаних задач.

Інформація про повторюваність температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду є невід'ємною складовою графіка Росандера, без якої його побудова неможлива. Ці дані накопичуються в результаті безперервних багаторічних спостережень за кліматом. Вони містять інформацію про тривалість стояння певних проміжків температур (зазвичай ці проміжки становлять 1...5 °C). Дані про повторюваність температур зовнішнього повітря для конкретного регіону зазвичай наявні в нормативних документах та довідниках. Надважливими ознаками даних про повторюваність температур зовнішнього повітря, що безпосередньо впливають на точність побудови графіка, є їх актуальність та величина часового проміжку, прийнята при їх розробленні. Значущість впливу актуальності температурних даних залежить від характеру кліматичних змін, що відбулися з моменту розробки таблиць часу стояння температур або їх останнього уточнення до моменту побудови графіку Росандера при проектуванні джерела теплоти. Проаналізувавши графік багаторічного ходу температур атмосферного повітря протягом зимових періодів в місті Києві [5] (рис 6), можна зробити висновок, що він складається з областей зростання та спадання температур, які хаотично замінюють одна одну. Тому, якщо аналізований часовий проміжок буде замалим, збільшується

ймовірність охоплення значною мірою лише області потепління або похолодання. Тому результати дослідження не відобразатимуть дійсний температурний хід опалювальних періодів. Це спричинить хибність графіка, а отже, можливу помилку вибору обладнання. У нормативних документах цей часовий проміжок зазвичай приймається не менше ніж 45 років.

У чинному ДСТУ-Н Б В.1.1 27:2010 «Будівельна кліматологія» відсутні дані про тривалість стояння температур зовнішнього повітря. В документі наявна інформація про розрахункову температуру зовнішнього повітря на опалення, розрахункову тривалість опалювального періоду, середньомісячні температури та кількість градусоднів для більшості міст України, що дозволяє розрахувати величину максимального теплового навантаження та визначити приблизну кількість теплоти, що може бути спожитою за опалювальний період, але немає даних про повторюваність температур зовнішнього повітря.

У попередньому нормативі СНіП 2.01.01.82 «Будівельна кліматологія і геофізика» дані про повторюваність температур зовнішнього повітря наявні, але вони базуються на кліматичних спостереженнях у період 1925-1975 рр. З урахуванням кліматичних змін останніх десятиліть їх можна вважати застарілими.

Останні дослідження та публікації. З проблемою застарілості та неповноти кліматичних нормативів зіштовхнулись і інші дослідники [6-9].

Дослідження в [6, 7] проводилися ще до появи ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія», тому головною метою даних робіт було виявлення впливу фактичних кліматичних умов на системи теплопостачання з метою впровадження додаткових заходів збереження енергоресурсів та внесення поправок до чинного на той час СНіП 2.01.01.82 «Строительная климатология и геофизика». Сутність досліджень полягала в аналізі добових та середньомісячних температур опалювальних періодів (терміни опалювальних періодів були прийняті з 15 жовтня по 15 квітня) 1996-2010 рр. для міста Києва, отриманих від Укргідрометеоцентру. При цьому результати порівняно з даними чинного на той час нормативного документу. У результаті було виявлено, що тривалість стояння всіх проміжків температур до $+8^{\circ}\text{C}$ відхиляється від нормативних значень у менший бік. Натомість повторюваність температур вище $+8^{\circ}\text{C}$ відхиляється в більший бік. Це засвідчує певне потепління. Визначено, що розрахункова температура на опалення (для Києва – -22°C), на яку за нормами проектується обладнання систем теплопостачання, утримується всього протягом декількох годин за опалювальний період. Отже, потенціал вибраного обладнання буде повністю використовуватися лише один день на рік у середньому. Для вирішення цієї проблеми в роботі пропонується створення комбінованих джерел теплоти, які передбачатимуть базові елементи для

забезпечення опалення до настання тих температур, нижче яких частота стояння знижується (для умов Києва це близько $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) та пікові джерела. Однак, для проєктування таких джерел теплоти пропонується використовувати інтегральний графік теплового навантаження за опалювальний період. Це є хибним за наявності повітряних теплових насосів у складі комбінованого джерела теплоти [4].

У ході дослідження було виявлено, що деяку частину опалювального періоду тривають температури вище ніж $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проте з урахуванням наявності коливань як в більший, так і в менший бік у перехідні періоди було запропоновано місцеве обмеження подачі теплоти в ці періоди замість скорочення строку опалювального періоду. Однак, слід зазначити, що в подальшому скорочення офіційного терміну опалювального періоду все ж відбулося. У відміненому нормативному документі тривалість опалювального періоду для міста Києва була близько 4448 годин, а в чинному нині документі її було скорочено до 4224 годин, що менше приблизно на 9 діб.

У підсумку тема даного дослідження, а також зроблені в ньому висновки, є дуже актуальними і дотепер. Зокрема важливим є висновок про потребу врахування актуальних кліматичних даних для більш точного проєктування систем теплопостачання та необхідності встановлення комбінованих джерел теплоти. Але через малий часовий відрізок аналізу (всього 15 років) та інтервали температур в $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для розроблених даних можна зробити висновок про їх недостатню точність і достовірність, що може значною мірою вплинути на правильність вибору обладнання та якість техніко-економічного розрахунку.

Дослідження [9] було проведено після виходу та набуття чинності ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія». Тому метою даної роботи було заповнення прогалини в цих нормах – відсутності даних про тривалість стояння температур зовнішнього повітря. Для цього було проведено аналіз масивів температур зовнішнього повітря за опалювальні періоди 2005-2018 рр., отриманих від метеорологічних станцій у різних обласних центрах України. Терміни опалювальних періодів для аналізу приймалися згідно з нормативом для кожної області відповідно. У ході дослідження, як і в попередніх роботах [6, 7], було виявлено, що не всі температури протягом опалювального періоду були нижче $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Але в даному дослідженні на відміну від попереднього були відкинуті температури вищі за $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а тому тривалість опалювального періоду для всіх областей було скорочено. Зокрема для Києва тривалість була зменшена до 3725 годин, що на 20 діб менше від нормативної тривалості. У роботі [7] зазначалося, що в перехідні періоди спостерігається значне коливання середньодобових температур як в більшу, так і в меншу сторони. Тому доцільнішим рішенням є місцеве обмеження подачі теплоти замість скорочення

опалювального періоду. А в будівлях з автономними джерелами теплоти опалювальний період може починатись і закінчуватись при температурах зовнішнього повітря вище $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ залежно від вподобань щодо теплового комфорту мешканців та відвідувачів. Тому загальна витрата теплоти за розрахунковий опалювальний період, визначена за даними стояння температур, що обмежуються $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ буде неповною. Інтервали температур становлять від 1 до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отже, результати більш деталізовано, ніж у даних, отриманих в попередньому дослідженні. Проте скорочення тривалості опалювального періоду та замалий часовий відрізок опалювальних періодів (всього 13 років), прийнятий до аналізу, не дають можливості підвищити точність побудови графіка Росандера.

Формулювання цілей статті. Аналіз попередніх досліджень [6, 7, 8, 9] показав, що необхідність визначення даних щодо тривалості стояння температур зовнішнього повітря досі залишається актуальною. Тому метою цієї роботи є проаналізувати дані стояння температур зовнішнього повітря для інтервалів температур в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ з урахуванням усіх температур, що охоплюють нормативні межі опалювального періоду для міста Києва. Досягти цього можна, проаналізувавши масив температур кожної години опалювальних періодів за більш тривалий часовий проміжок. Дане дослідження дозволить актуалізувати, уточнити та доповнити результати проведених раніше досліджень.

Основна частина. Для проведення цього дослідження нами був використаний архів погодинних кліматичних даних для географічних координат головного корпусу КНУБА в місті Києві від метеорологічної компанії Meteoblue [10]. Висока повнота та якість цих даних пояснюється тим, що вони є результатом моделювання клімату. Тобто цей архів містить збережені прогнози, а не вимірювання.

Погодні моделі Meteoblue ділять світ або регіон на просторові сітки з маленькими комірками. Кожна комірка має ширину від 4 до 40 км та висоту від 0,1 до 2 км. Моделі містять 60 атмосферних шарів і досягають висоти стратосфери. Погода моделюється шляхом вирішення складних математичних рівнянь, що описують взаємодію між усіма комірками сітки що кілька секунд. Змінні параметри погоди, такі як температура, швидкість вітру або хмарність, зберігаються за кожну годину. Крім великої кількості власних моделей, Meteoblue інтегрує також відкриті дані з різних джерел і вносить їх у загальну базу даних погоди. Крім того, за наявності даних кліматичних вимірювань, Meteoblue додатково порівнюють їх з результатами моделювання для досягнення найбільш реалістичного опису кліматичних явищ [10].

Оскільки офіційних і надійних метеостанцій мало, а більшість вимірювань, які вони отримують, корисні лише для радіусу від 3 до 12 км [10], можна

стверджувати, що дані моделювання клімату мають перевагу над даними вимірювань, адже моделювання охоплює будь-яке місце на землі в будь-який момент часу, на відміну від вимірювань з метеостанцій, площа покриття яких охоплює менше 1% поверхні світу [10]. Крім того, моделювання буде більш точним ніж вимірювання, зроблені на відстані 20 км чи більше від об'єкту.

З описаного кліматичного архіву для географічних координат головного корпусу КНУБА були прийняті до аналізу змодельовані дані температур за період 1985-2022 рр. (модель NEMS) та змодельовані і уточнені за допомогою вимірювань дані температур за період 1982-2022 рр. (модель ERA5T). Окрім змодельованих кліматичних даних Meteoblue, до аналізу були прийняті також дані вимірювань температури зовнішнього повітря з метеостанції в аеропорту «Київ» за період 1998-2021 рр. [11]. Метеостанція розташована на відстані приблизно 3,5 км від будівлі головного корпусу КНУБА, що говорить про достатню достовірність результатів її вимірювань відносно університету. Однак, на відміну від даних Meteoblue, дані вимірювань використовувались середньодобові, а не погодинні, що вносить деяку похибку. Для оброблення масиву даних використовувалася програма Excel з програмного пакету Microsoft Office.

Температурні дані завантажувались окремо для кожного року та кожної моделі. Як часові проміжки для завантаження було обрано періоди з 15 жовтня по 15 квітня для кожного року з метою охоплення нормативних меж опалювального періоду з деяким «запасом». Загалом тривалість цього часового проміжку становить 4392 години для звичайного та 4416 годин для високосного року.

Наступним кроком здійснювалося сортування масивів температур за величиною, тобто за спаданням температур, окремо для кожного року та для кожного різновиду даних. Після цього проводився розрахунок повторюваності проміжків температур в 1 °C також окремо для кожного року та різновиду даних. Далі розраховувалося середнє арифметичне значення тривалості стояння кожного проміжку температур за прийняті роки для кожного різновиду даних окремо. Для розрахованих значень середніх тривалостей стояння температур визначалися довірчі інтервали за методикою [12].

Результати розрахунку тривалості стояння проміжків температур та середнє значення тривалості кожного проміжку разом з довірчими інтервалами зображено на графіках тривалості стояння проміжків температур: за даними моделі NEMS на рис. 1, за даними уточненої вимірюваннями моделі ERA5T на рис. 2, за даними вимірювань з метеостанції в аеропорту «Київ» на рис. 3 і порівняння даних на рис. 4. Представлено розподіл частот повторюваності кожного проміжку температур за відповідні опалювальні періоди.

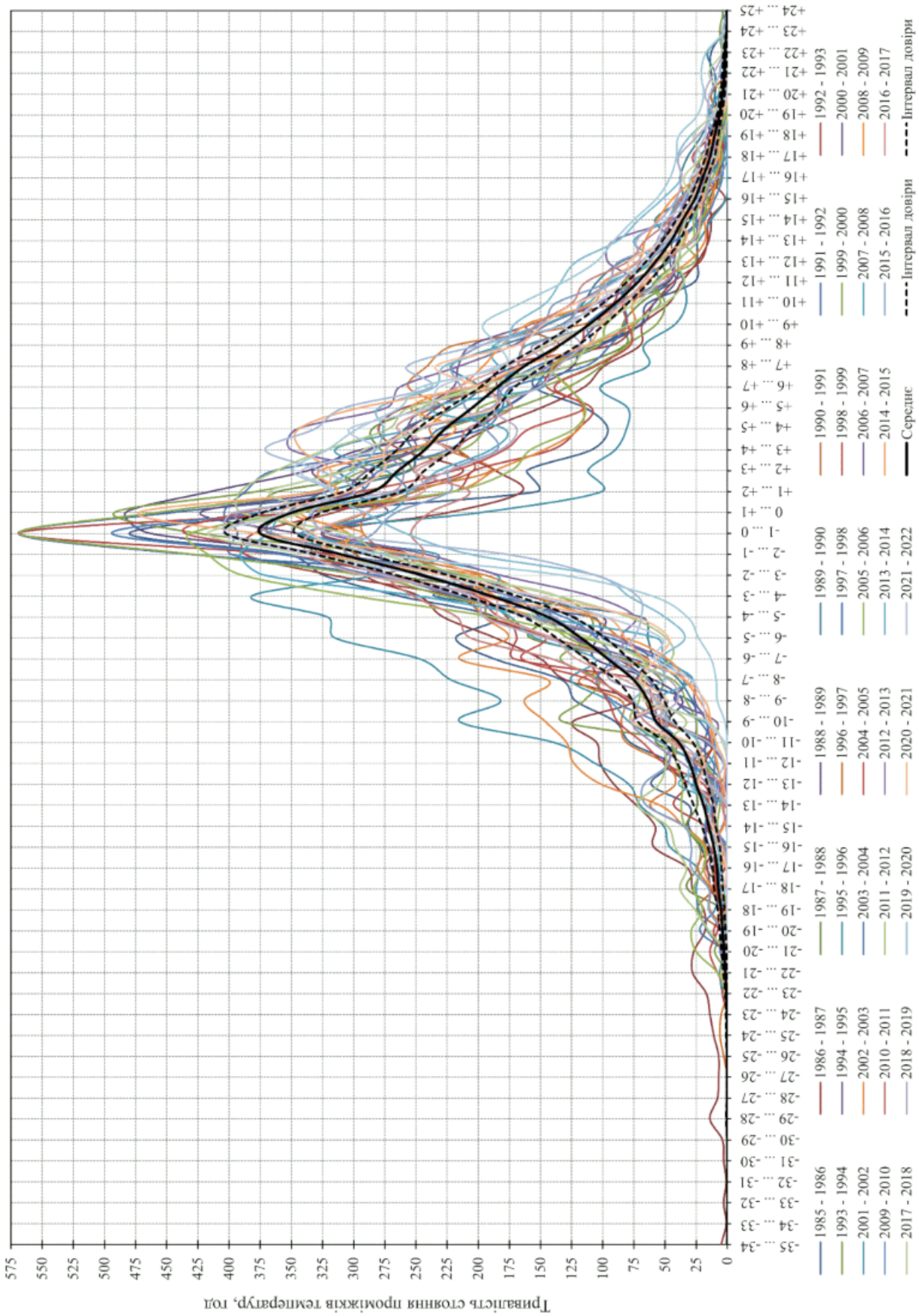


Рис. 1. Графік тривалості стояння проміжків температур прогрягом опалювальних періодів 1985 – 2022 років згідно з моделлю NEMS.

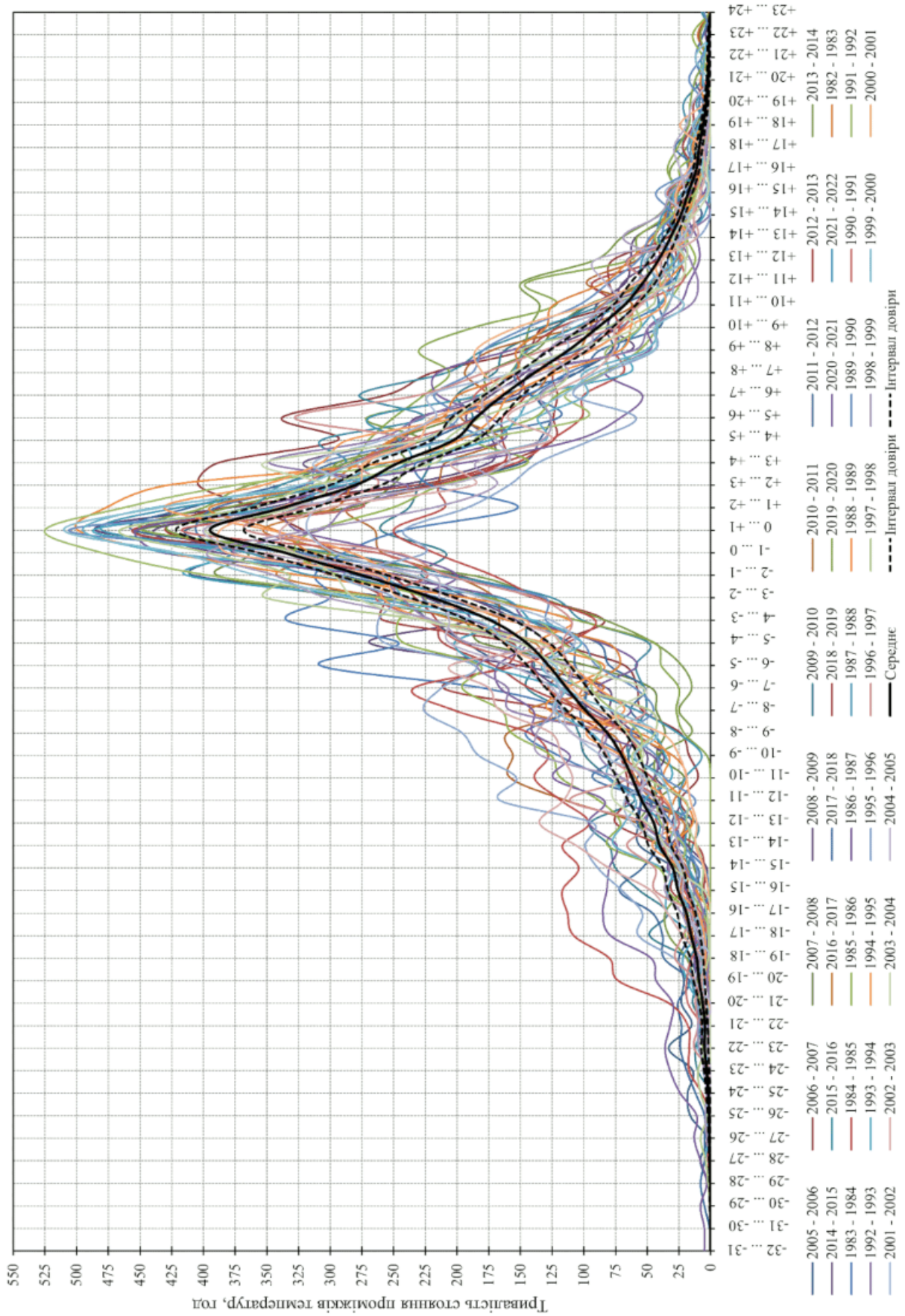


Рис. 2. Графік тривалості стояння проміжків температур протягом опалювальних періодів 1982 - 2022 рр. згідно з моделлю ERA5.

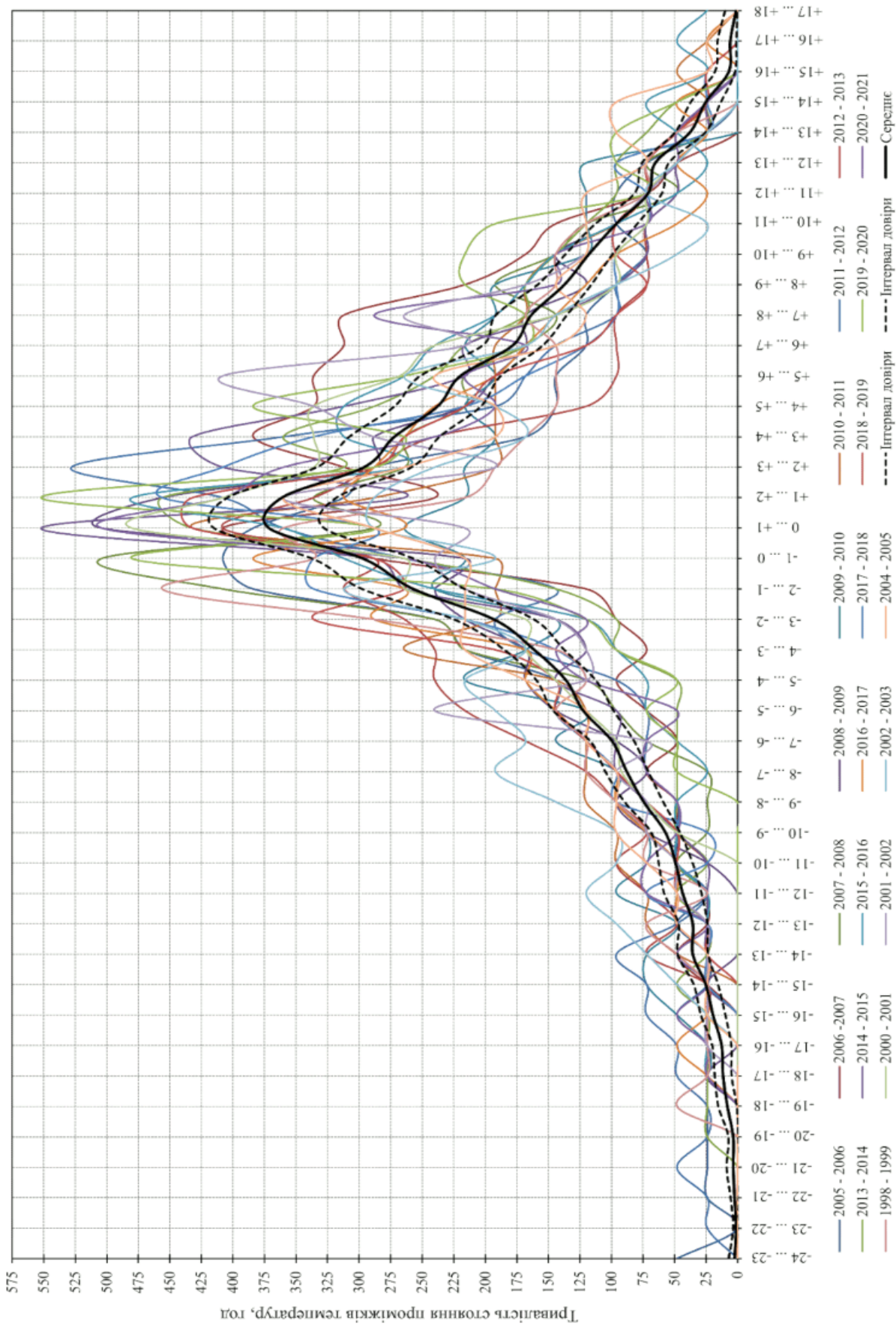


Рис. 3. Графік Тривалості стояння проміжків температур протягом опалювальних періодів 1998 – 2021 рр. згідно результатів вимірювань в аеропорту «Київ».

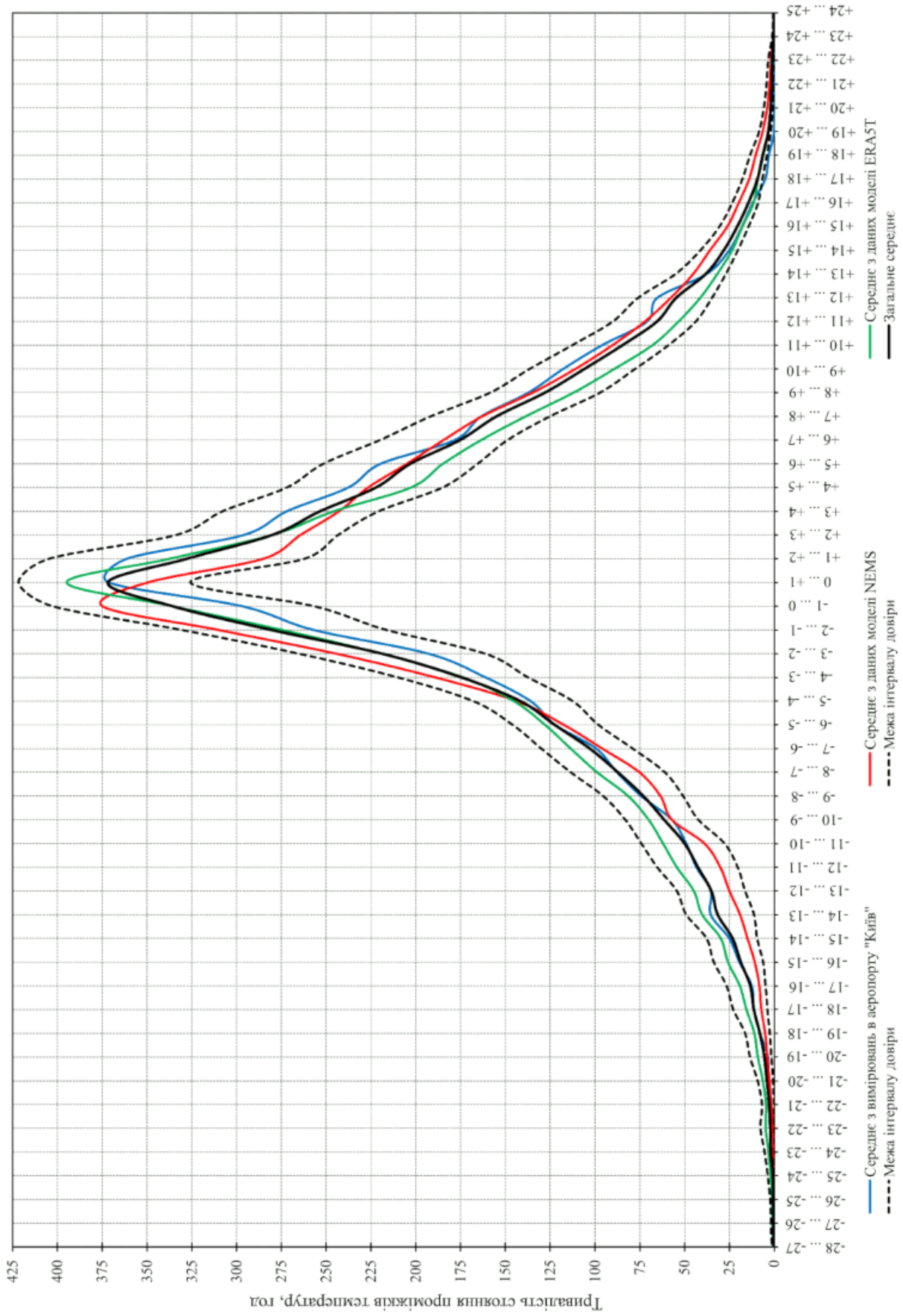


Рис. 4. Порівняння середніх тривалостей стояння проміжків температури зовнішнього повітря, визначених за різними кліматичними даними.

З представлених графіків видно, що розмах тривалостей стояння температур окремих опалювальних періодів відносно одне одного доволі великий. Для деяких проміжків температур він досягає 300 годин, що рівноцінно 12 добам стояння цього проміжку. Найбільший розмах тривалостей спостерігається для проміжків температур, які утримуються найдовше (від мінус 1 до плюс 1 °C), що підтверджується довірчими інтервалами в цих проміжках. Зображені довірчі інтервали показують межі, які з 95 % ймовірністю охоплюють істинне середнє значення тривалості кожного проміжку температур. Довірчі інтервали в проміжках, що стоять найдовше, мають ширші межі. Але навіть при цьому найбільше можливе відхилення від середнього не перевищує двох діб.

Найбільший розкид даних за всіма проміжками температур спостерігається на графіку, побудованому на основі результатів вимірювань з метеостанції в аеропорту «Київ» (рис. 3). Це підтверджується також і ширшим, порівняно з іншими моделями, довірчим інтервалом. Це пояснюється використанням середньодобових температур замість погодинних при розрахунку тривалості стояння температур та майже вдвічі меншим часовим проміжком даних, доступних до аналізу, порівняно з моделями NEMS та ERA5T. Враховуючи перелічені недоліки, представлені дані вимірювань з метеостанції можна вважати більш «грубими» порівняно з моделями. Але це не є проблемою, якщо враховувати, що головною метою аналізу масиву температур з метеостанції є не аналіз даних стояння температур, а виявлення моделі, що є більш наближеною до дійсності.

Довірчий інтервал усередненої кривої (рис. 4) складається з довірчих інтервалів усіх варіантів масивів даних. З представленого порівняльного графіку видно, що «найхолоднішою» моделлю через найбільшу тривалість низьких температур виявилася модель ERA5T. Але оскільки вона не занижує тривалість стояння низьких температур відносно даних вимірювань з метеостанції, так як це робить модель NEMS, можна стверджувати, що вона є точнішою з представлених. Даний факт підтверджується також і розробниками даних моделей [10]. Тому для формування даних щодо тривалості стояння температур зовнішнього повітря були прийняті результати розрахунків за даними моделі ERA5T. Розраховані в результаті аналізу масиву погодинних температур зовнішнього повітря опалювальних періодів 1982-2022 рр. за моделлю ERA5T дані стояння температур з проміжками в 1 °C представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Середня тривалість стояння проміжків температур зовнішнього повітря для міста Києва, визначена на основі даних моделі ERA5T

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Діапазон температур	-26 ... -25,1	-25 ... -24,1	-24 ... -23,1	-23 ... -22,1	-22 ... -21,1	-21 ... -20,1	-20 ... -19,1	-19 ... -18,1	-18 ... -17,1	-17 ... -16,1	-16 ... -15,1	-15 ... -14,1	-14 ... -13,1	-13 ... -12,1	-12 ... -11,1	-11 ... -10,1
Кільк. годин з темп. в даному інтервалі, год	1	2	3	4	5	6	9	11	15	19	26	30	40	45	54	62
Кільк. годин з темп. нижче за дану, год	1	3	6	10	15	21	30	41	56	75	101	131	171	216	270	332

№	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Діапазон температур	-10 ... -9,1	-9 ... -8,1	-8 ... -7,1	-7 ... -6,1	-6 ... -5,1	-5 ... -4,1	-4 ... -3,1	-3 ... -2,1	-2 ... -1,1	-1 ... -0,1	0 ... 0,9	1 ... 1,9	2 ... 2,9	3 ... 3,9	4 ... 4,9	5 ... 5,9
Кільк. годин з темп. в даному інтервалі, год	70	81	99	114	128	145	173	219	276	337	396	338	280	247	203	186
Кільк. годин з темп. нижче за дану, год	402	483	582	696	824	969	1142	1361	1637	1974	2370	2708	2988	3235	3438	3624

№	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Діапазон температур	6 ... 6,9	7 ... 7,9	8 ... 8,9	-9 ... -9,9	-10 ... -	-11 ... -	-12 ... -	-13 ... -	-14 ... -	-15 ... -	-16 ... -	-17 ... -	-18 ... -	-19 ... -	Разом
Кільк. годин з темп. в даному інтервалі, год	164	139	112	89	69	54	41	32	22	16	11	9	6	4	4392
Кільк. годин з темп. нижче за дану, год	3788	3927	4039	4128	4197	4251	4292	4324	4346	4362	4373	4382	4388	4392	

Хоча представлені спрощені дані було визначено для географічних

координат головного корпусу КНУБА в місті Києві, з достатньою точністю можна стверджувати, що вони будуть актуальними для усієї правобережної частини міста Києва або для всього міста, але з меншою точністю.

Для порівняння розроблених в ході дослідження температурних даних з тими, що були отримані в роботах інших авторів [7, 9], а також температурними даними з попереднього нормативного документу, був проведений розрахунок загальної кількості спожитої теплоти за розрахункові опалювальні періоди перелічених температурних даних за допомогою методу трапецій для чисельного інтегрування [13]. Максимальне теплове навантаження було прийнято 100 кВт. Для більш коректного порівняння даних (рис. 5) між собою розрахунок проводився для двох варіантів тривалості опалювального періоду: для нормативної тривалості згідно з чинним ДСТУ-Н Б В.1.1 27:2010 «Будівельна кліматологія» та для варіанту закінчення опалювального періоду на середньодобовій температурі +8 °С.

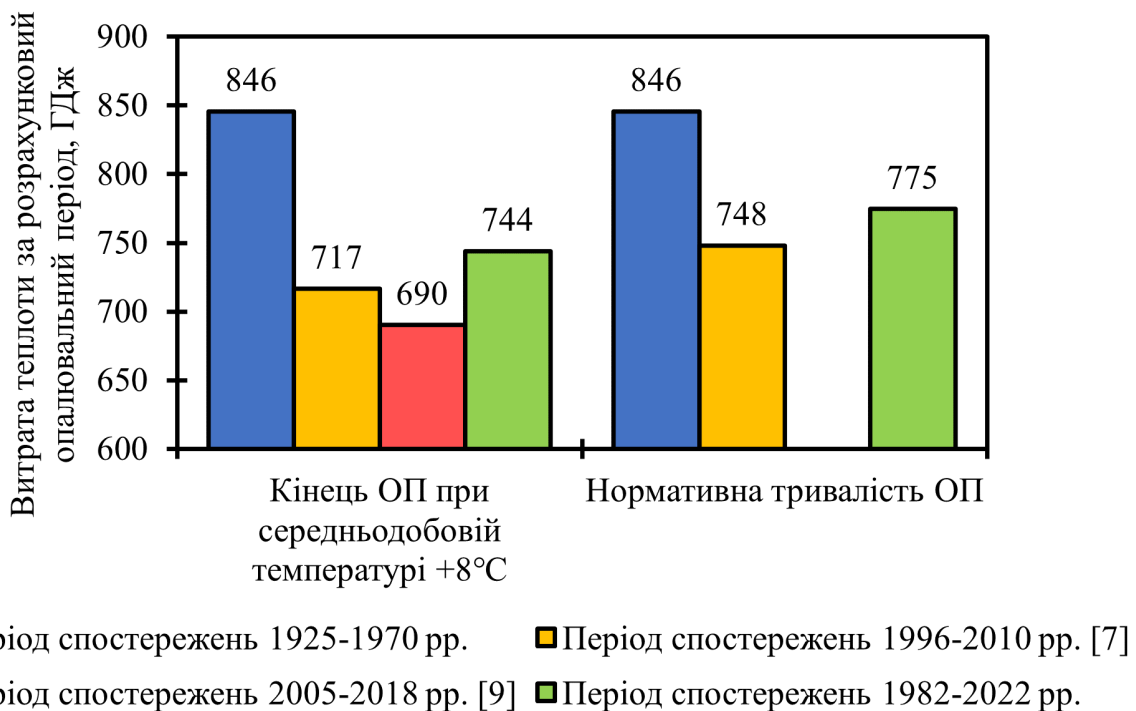


Рис. 5. Порівняння кількості теплоти, спожитої за розрахунковий опалювальний період, визначеної за різними температурними даними.

З гістограми видно, що найбільша розрахункова витрата теплоти виникає при використанні температурних даних зі скасованого нормативу (1925-1970 рр.). При цьому протягом усієї нормативної тривалості опалювального періоду згідно з цими даними утримується температура нижче +8 °С. Натомість при використанні для розрахунку усіх інших даних виникає певна різниця у

кількості теплоти між розрахунками за прийнятою нормативною тривалістю та за тривалістю до досягнення $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$, що пояснюється наявністю в нормативному опалювальному періоді температур вище $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Загалом різницю у витраті теплоти між результатами розрахунку за даними застарілого нормативу з іншими даними можна пояснити кліматичними змінами, що відбулись за ці роки, які характеризуються певним потеплінням. Даний факт також підтверджуються в роботах інших дослідників [6, 7, 9]. Однак, у перелічених дослідженнях величина цього потепління дещо переоцінена. Це можна побачити з гістограми, якщо звернути увагу на кількість спожитої за розрахунковий опалювальний період теплоти порівняно з даними, отриманими в результаті аналізу більшої кількості опалювальних періодів. Ця різниця становить від 27 до 54 ГДж, що еквівалентно від 3 до 6 діб максимального теплового навантаження або ж від 6 до 12 діб теплового навантаження при температурі зовнішнього повітря $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таку різницю можна пояснити надто малим часовим проміжком, прийнятим до аналізу (13 та 15 років), та використанням середньодобових температур зовнішнього повітря в дослідженнях [6, 7, 9].

З метою детальнішого оцінювання величини та характеру потепління, що відбулося за період з 1973 по 2023 рік, та його порівняння із кліматичними змінами попередніх років, аналогічно до досліджень [5] (рис. 6) було розраховано ковзкі середні п'ятирічні температури зимових періодів за ці роки (рис. 7) на основі даних моделі ERA5T [10] та побудовано поліноміальний тренд третього порядку. Усереднення температур методом ковзких п'ятирічних середніх було здійснено з метою зменшення величини випадкових відхилень та простішого виявлення основних закономірностей змін середніх температур зимових періодів [5]. Але виявилось, що навіть після цього мінливість середніх температур зимових періодів залишається досить великою.

З графіку на рис. 6 видно, що багаторічний хід середніх температур зимових періодів згідно з [5] характеризується хвилями похолодання та потепління, які періодично замінюють одна одну. Це ж саме можна прослідкувати і на графіку, побудованому на основі даних моделі ERA5T (рис. 7), яка хронологічно продовжує хід температур попереднього графіка. Зіставивши їх разом, можна побачити, що за областю потепління, що почалась приблизно після 1960 р. слідує область похолодання, яка закінчилась після 1980 р.

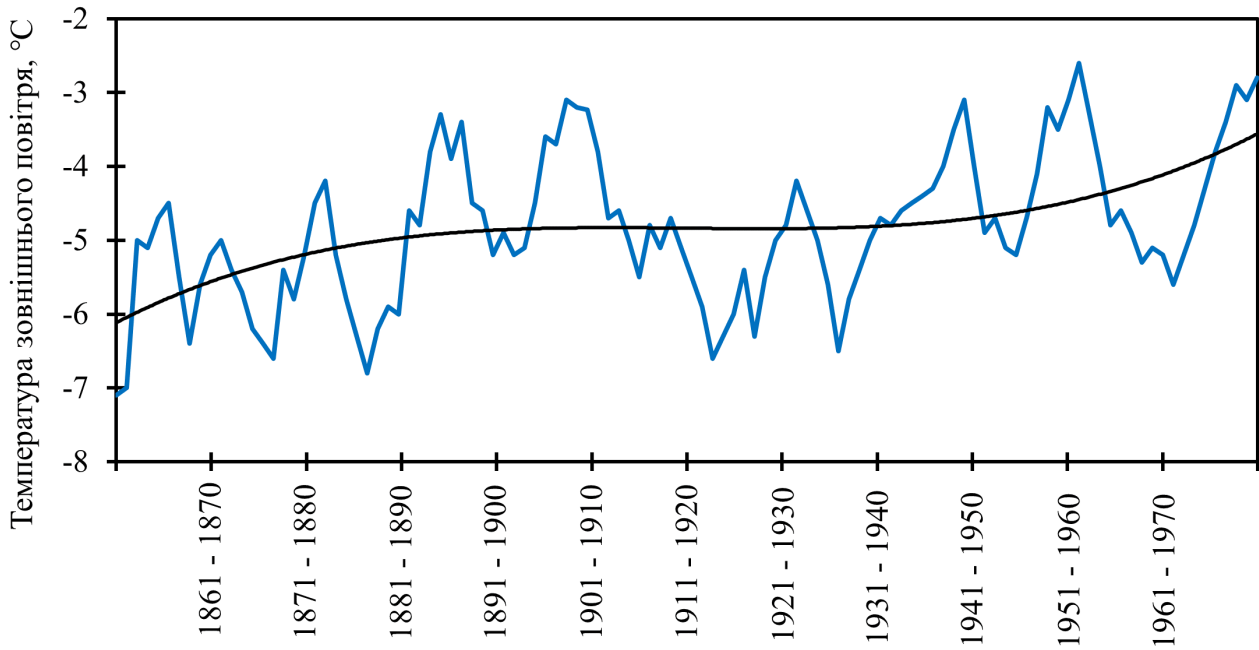


Рис. 6. Ковзкі п'ятирічні середні температури зовнішнього повітря зимових періодів 1861 – 1970 років та їх поліноміальний тренд [5].

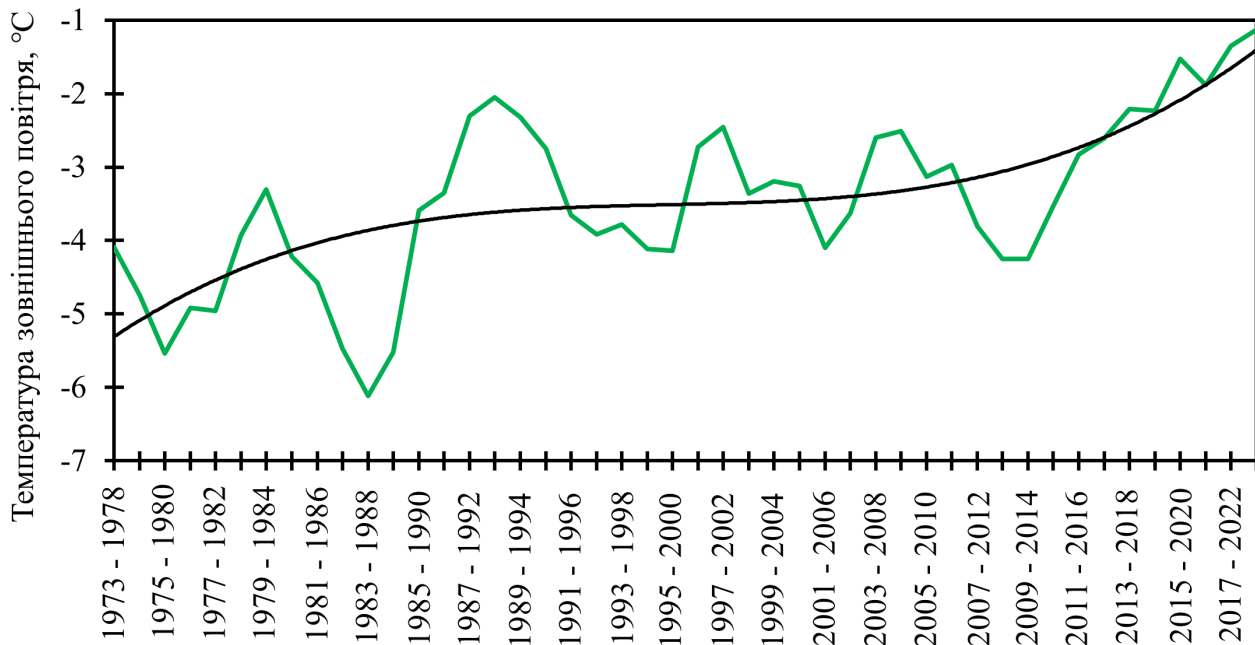


Рис. 7. Ковзкі п'ятирічні середні температури зовнішнього повітря зимових періодів 1973 – 2023 років та їх поліноміальний тренд

При цьому починаючи з хвилі потепління, яка почалась приблизно в 1930-х роках середні температури в піках областей похолодання наступних років вже не досягали величини похолодань попередніх років. І тільки середня температура піку області похолодання в період 1983-1988 рр. наблизилась, до тих що виникали раніше. Але вже після 1988 р. почалась нова інтенсивна хвиля

потепління і тенденція до підвищення середніх температур піків «холодних» та «тепліх» областей продовжилася. Точність представлених поліноміальних моделей не дозволяє здійснювати прогноз середніх температур майбутніх зимових періодів, але вони дають можливість оцінити загальну інтенсивність процесу потепління. Тренди обох графіків підтверджують, що незважаючи на мінливість областей похолодання та потепління вектор все ж таки напрямлений в бік підвищення середніх температур зимових періодів. Але порівнявши їх між собою, можна помітити, що за зимові періоди 1973-2023 рр. потепління відбувалося більш інтенсивно, ніж за періоди 1861-1970 рр.

Висновки. З урахуванням мінливості температур зовнішнього повітря можна зробити висновок про необхідність постійного моніторингу за кліматичними змінами та своєчасного оновлення кліматологічних нормативів. А при їх оновленні та доповненні необхідно спиратись не лише на сьогоденні та минулі кліматичні зміни, а і зазирати наперед за допомогою сучасних методів та засобів моделювання. Ці заходи посприяють підвищенню точності вибору обладнання, а отже і зменшенню витрати енергоносіїв системами теплопостачання. Зважаючи на зменшення тривалості стояння низьких температур протягом опалювального періоду та загальну тенденцію до потепління можна стверджувати про необхідність перевірки актуальної розрахункової температури на опалення в подальших дослідженнях

References

1. Wdowikowski Marcin. "Zasady formułowania probabilistycznych modeli deszczów maksymalnych". *Gaz, woda i technika sanitarna*, Iss. 97, № 1, 2023, pp. 24–31.
2. Lysenko L. I., Makhotilo K. V., Kosaty D. M. "Faktory vplyvu na efektyvnist soniachnykh kolektoriv ta fotoelektrychnykh panelei v Kharkivskii oblasti". *Visnyk NTU «KPI»*, Iss. 59, 2013, pp. 101–111.
3. Zabolotska T. M., Skrynyk O. A. "Prohnozuvannia dat stiikoho perekhodu serednoi dobovoi temperatury povitria cherez zaznacheni mezhi". *Naukovi pratsi Ukrainskoho naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu*, Iss. 258, 2009, pp. 84–105.
4. Hlamazdin P. M., Koziachyna B. I. "Zastosuvannia metodiv chyselnoho intehruvannia dlia vyboru obladnannia kombinovanykh dzherel teploty". *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, Iss. 14, 2023.
5. *Klimat Kievа*. Gidrometeoizdat, 1980, 274 p.
6. Deshko V. I., Shovkaliuk M. M. "K voprosu o vliyanii pogodnykh uslovii na effektivnost teplosnabzheniya". *Promishlennaya teplotekhnika*, Iss. 29, № 7, 2007, pp. 88–91.

7. Deshko V. I., Shovkaliuk M. M. Temperaturno-pohodni faktory teplopostachannia. pp. 79–87, repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/946a4142-df2e-446f-ad2f-15a1fef236a9/content.
8. Shovkaliuk M. M., Voinalovych N. O., Voinalovych O. O. "Analiz rozrakhunkovykh parametriv zovnishnoho povitria dlia teplopostachannia". *Budivelni konstruktsii*, Iss. 77, 2013, pp. 157–61.
9. Kramar V. H. "Pobudova hrafika tryvalosti teplovoho navantazhennia (hrafika Rosandera) dlia rehioniv Ukrainy". *Promyslova teplotekhnika*, Iss. 40, № 4, 2018, pp. 41–49.
10. "Historical Weather Data" Meteoblue, www.meteoblue.com/en/weather/archive/export.
11. "Kyiv, Ukraine Weather History Weather Underground". Local Weather Forecast, News and Conditions Weather Underground, www.wunderground.com/history/daily/ua/kyiv/UKKK.
12. Ierina A. M., Palian Z. O. *Teoriia statystyky*. Znannia, 1997.
13. Kyrylyk L. V., Bohach I. V., Lisovenko A. I. *Chyselni metody. Chyselne intehruvannia funktsii*. VNTU, 2019.

UDC 620.9

Associate Professor **Pavlo Glamazdin**,
sib.kiev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2611-2687,
Post-graduate **Bohdan Koziachyna**,
bohdankoziachyna@gmail.com, ORCID: 0009-0000-6972-3862,
Kyiv National University of Construction and Architecture

ACCOUNTING FOR CLIMATE CHANGES WHEN CONSTRUCTING THE ROSSANDER GRAPH

The temperature of the atmospheric air affects the design and indicators of energy efficiency of all elements of heat supply systems. An extremely important tool to develop heat sources that allows us to assess changes in consumer heat loads and model algorithms for heat source operation, taking into account the variability of outdoor air temperature in the geographical conditions of the design objects, is a graph of the duration of heat loads during the heating period (Rossander's graph). It is impossible to construct the Rossander's graph without data on the duration of the outdoor temperature standing during the heating period. In this paper, the problem of the lack of temperature data necessary for the construction of the Rossander's graph

in the current regulatory documents is revealed. The analysis of previous studies that produced temperature data with the duration of temperature standing is carried out, and the need for their refinement is substantiated. The arrays of hourly outdoor air temperatures were processed according to two weather models, as well as the array of average daily temperatures obtained as a result of measurements from the weather station for the geographical location of the main building of KNUCA. As a result of the comparative analysis, a model closer to reality was identified and, on its basis, actual data on the duration of outdoor temperatures standing for the city of Kyiv with a temperature step of 1°C were developed. The obtained temperature data were compared with those that were developed in previous studies, as well as with the temperature data that are contained in the cancelled standard. The curve of the long-term run of the moving average outdoor air temperatures for the winter periods of 1973-2023 and its polynomial trend are constructed and compared with the curve that characterizes the run of the moving average five-year temperatures for the winter periods of 1861-1970 and its polynomial trend.

Key words: climate changes, Rossander's graph, duration of temperature standing.

УДК 697.92

професор **Віктор Мілейковський**,
mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8543-1800
асистент **Володимир Вахула**,
v.vahula@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-6421
асистент **Олексій Дудніков**,
dudnikov.oa@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-2656-2683
Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРООБМІНУ З БАГАТОСТРУМИННИМИ ПОВІТРОРОЗПОДІЛЬНИКАМИ

***Анотація.** Для забезпечення оптимальних умов у музейних приміщеннях одним із важливих аспектів є система кондиціонування повітря. Традиційні системи вентиляції та кондиціонування повітря з постійною витратою повітря можуть бути не ефективні. У контексті оптимізації мікроклімату в приміщеннях музеїв, принциповою є реалізація технологічних норм та вимог, спрямованих на стабілізацію температурно-вологісного режиму. Важливо зазначити, що умови збереження музейних експонатів передбачають незмінність температурного (16-24 °С, оптимально 18-22 °С) та вологісного (55 % ± 5 %) режимів. Багатоструминні повітророзподільники в системах із змінною витратою – це один із сучасних підходів, який може забезпечити оптимальні параметри для музейних приміщень. У роботі розглянуто теоретичні дослідження багатоструминого повітророзподільника, який може створювати вісесиметричну та віялову струмини, а також комбінувати ці струмини разом. Уточнено формулу для коефіцієнта неізотермічності струмин, що подаються вертикально проти впливу гравітаційних сил, відповідно до експериментальних даних. Моделювалися три схеми подавання повітря вертикально вниз: вісесиметричною струминою, віяловою струминою та обома струминами. Для приміщення виставкової зали виконано моделювання розподілу температури, швидкості та відносної вологості повітря на висоті 1,5 м (місце розміщення картин). У результаті виявлено, що подавання компактною охолодженою струминою ефективно лише при витраті повітря 25 %. Подавання віяловою охолодженою струминою забезпечує нормативні параметри повітря. Нагріта віялова струмина спливає і не досягає робочої зони. Подавання нагрітою вісесиметричною струминою вимагає регулювання площі випуску повітря.*

Ключові слова: багатоструминний повітророзподільник, музей, мікроклімат, вентиляція, кондиціонування повітря, змінна витрата повітря, ступінь регулювання, математична модель.

Вступ. Науковці та фахівці в галузі зберігання та консервації об'єктів культурної спадщини досліджують та впроваджують різні технології для забезпечення оптимальних умов у музейних приміщеннях. Одним з найважливіших аспектів є системи вентиляції та кондиціонування повітря. Вони відіграють критичну роль у підтриманні стабільної температури та вологості повітря, а також у забезпеченні високої якості повітря для збереження та захисту експонатів. Однак, традиційні системи вентиляції та кондиціонування повітря з постійною витратою можуть бути неефективними та недоцільними у виставкових залах музеїв. Використання багатострумінних повітророзподільних пристроїв у системах зі змінною витратою є новим підходом, який може забезпечити оптимальне співвідношення між зменшенням енергоспоживання та забезпеченням комфортних умов для відвідувачів та експонатів. Такі системи можуть адаптуватися до змін зовнішніх факторів, це дозволяє знижувати витрати енергії, зберігаючи при цьому високу якість повітря і стабільні параметри в середині виставкових залів.

Останні дослідження та публікації. У контексті оптимізації мікроклімату в приміщеннях музеїв, принциповою є реалізація технологічних норм та вимог, спрямованих на стабілізацію температурно-вологісного режиму. Важливо зазначити, що умови збереження музейних експонатів передбачають незмінність температурного (16-24 °C, оптимально 18-22 °C) та вологісного ($55 \pm 5\%$) режимів. Надважливим є наявність автоматизованих систем моніторингу та регулювання мікроклімату, забезпечуючи таким чином цілодобовий та цілорічний контроль параметрів повітря, що є критичним для оптимального зберігання творів мистецтва [1].

Розподіл простору музею визначається функціональними потребами [2], зокрема:

- допоміжні приміщення, які не використовуються для зберігання колекцій, обладнуються стандартними системами вентиляції та кондиціонування повітря, які застосовуються у загальнобудівельній практиці.
- виставкові та експозиційні зали, які містять колекції і доступні для відвідувачів, вимагають індивідуалізованого підходу до вентиляції, щоб забезпечити стабільність мікроклімату.
- фондосховища з обмеженим доступом також потребують окремих систем вентиляції, не інтегрованих з іншими частинами музею, щоб забезпечити оптимальне зберігання експонатів.

Для уникнення складних експериментів при дослідженні поітророзподілення було показано ефективність математичного моделювання методами обчислювальної гідромеханіки [3]. Проте аналітичні методи дозволяють швидше проводити аналіз поведінки струмінних течій.

Затухання неплоских струминних течій описується [4] формулами для максимальної швидкості й надлишкової температури:

$$V_{x,m} = V_o \cdot m \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{X} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_n, \text{ м/с}, \quad (1)$$

$$\Delta T_{x,m} = \Delta T_o \cdot n \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{X} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_n^t = \Delta T_o \cdot n \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{X} \cdot \frac{K_{\text{вз}}}{K_n}, \text{ К}. \quad (2)$$

де V_o – початкова швидкість, м/с; m – коефіцієнт затухання швидкості, що для деяких струмин може залежати від X ; F_o – площа випуску струмини, м², X – довжина шляху струмини, м; ΔT_o – надлишкова температура, К, n – коефіцієнт затухання температури, що для деяких струмин може залежати від X ; $K_{\text{вз}}$ – коефіцієнт взаємодії паралельно випущених струмин; K_n – коефіцієнт неізотермічності за формулою

$$K_n = (1 \pm 2,5 \cdot Ar_x)^{1/3}; \quad (3)$$

Ar_x – плинний критерій Архімеда

$$Ar_x = Ar_o \cdot \frac{n}{m^2} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{F_o}} \right)^2; \quad (4)$$

Ar_o – початковий критерій Архімеда

$$Ar_o = \frac{g \cdot \Delta T_o \cdot \sqrt{F_o}}{V_o^2 T_{\text{нав}}}; \quad (5)$$

K_n^t – коефіцієнт неізотермічності за надлишковою температуою, який у [5] прийнято $1/K_n$.

Формули (1-5) дозволяють аналітично визначити особливості розвитку струмин, що застосовуються у вентиляції та кондиціонуванні повітря.

Метою роботи є дослідження розвитку припливних струмин для різних способів подачі повітря до робочої зони виставкових зал музеїв для систем кондиціонування повітря зі змінною витратою.

Визначення умови руйнування струмини. При вентиляванні приміщень спеціального призначення виникають випадки подавання струмин з високими

числами Архімеда. Тому перевіримо умови розвитку струмин проти гравітаційних сил за таких умов.

Спочатку підставимо формули (3, 4) до (1, 2):

$$V_{x,m} = V_o \cdot F_o^{1/2} \cdot K_{\text{гз}} \cdot m \cdot \left(\frac{1}{X^3} \pm \frac{2,5 \cdot \frac{Ar_o \cdot n}{F_o \cdot m^2}}{X} \right)^{1/3}, \text{ м/с.} \quad (6)$$

$$\Delta T_x = \Delta T_o \cdot F_o^{1/2} \cdot K_{\text{гз}} \cdot n \cdot \frac{1}{\left(X^3 \pm 2,5 \cdot \frac{Ar_o \cdot n}{F_o \cdot m^2} \cdot X^5 \right)^{1/3}}, \text{ К.} \quad (7)$$

Для зручності аналізу позначимо вирази, що є константами, за умови постійних значень m і n :

$$A_m = V_o \cdot \sqrt{F_o} \cdot K_{\text{гз}} \cdot m > 0, \quad (8)$$

$$A_n = \Delta T_o \cdot \sqrt{F_o} \cdot K_{\text{гз}} \cdot n > 0, \quad (9)$$

$$B = 2,5 \cdot \frac{Ar_o \cdot n}{F_o \cdot m^2} > 0. \quad (10)$$

Формули (7) і (8) та їхні похідні вздовж X при $m = \text{const}$ і $n = \text{const}$ з урахуванням позначень (8-10) набудуть вигляду:

$$V_x = \frac{A_m \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{1/3}}{X} = A_m \cdot \left(\frac{1}{X^3} \pm \frac{B}{X} \right)^{1/3}, \text{ м/с,} \quad (11)$$

$$\Delta T_x = A_n \cdot \frac{1}{X \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{1/3}} = A_n \cdot \frac{1}{(X^3 \pm B \cdot X^5)^{1/3}}, \text{ К,} \quad (12)$$

$$\frac{d K_n}{d X} = \pm \frac{2}{3} \cdot \frac{B \cdot X}{(2,5 \pm B \cdot X^2)^{2/3}}, \text{ м}^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{d V_x}{d X} = - \frac{A_m}{3} \cdot \frac{3 \pm B \cdot X^2}{X^2 \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{2/3}}, \text{ с}^{-1}, \quad (14)$$

$$\frac{d \Delta T_x}{d X} = - \frac{A_n}{3} \cdot \frac{3 \pm 5 \cdot B \cdot X^2}{X^2 \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{4/3}}, \text{ К/м} \quad (15)$$

Вирази (11-15) дають монотонне спадання максимальної швидкості та надлишкової температури при знаку «плюс», тобто коли сили гравітації та інерції діють в одному напрямку. Знак «мінус» при протидії цих сил призводить до можливості зростання цих величин. Це неможливо і свідчитиме лише про руйнування струмини силами гравітації. Також вирази в дужках формул (11) і (12) можуть стати від'ємними, що означає зворотний напрямок руху струмини – руйнування.

Визначаємо відповідні додатні значення X , м (табл. 1). Серед усіх значень найменше відповідає нульовій похідній надлишкової температури. (виділено в табл. 1). Підставляємо до виразу для цього значення з табл. 1 формулу (10) і маємо значення абсциси, за якого це відбувається (коефіцієнт заокруглювати в більший бік не можна через можливі помилки комп'ютерного розрахунку):

$$X_p = m \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot F_o}{Ar_o \cdot n}} \approx 0,489 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{F_o}{Ar_o \cdot n}}, \text{ м.} \quad (16)$$

Підставляємо формулу (16) до (4) і маємо мінімальне значення критерію Архімеда $Ar_x = 0,24$. Але струмина за дослідними даними має руйнуватися при $Ar_x = 0,4$. Аналогічні розрахунки для значень, що змінюють знак швидкості та обертають похідні на нескінченні (в табл. 1 виділено жирними рамками), дають

$$X_{pyin} = \frac{m \cdot \sqrt{0,4 \cdot F_o}}{Ar_o \cdot n} \approx 0,632 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{F_o}{Ar_o \cdot n}}, \text{ м.} \quad (17)$$

Підставляємо формулу (16) до (4) і маємо правильне максимальне значення критерію Архімеда $Ar_x = 0,4$.

Таблиця 1. Значення $X > 0$, за яких порушуються умови розвитку струмини при знаку «мінус» у формулах (3), (6) і (7)

Величина	Значення X , м, що забезпечує			
	значення величини		значення похідної	
	нуль	нескінченність	нуль	нескінченність
V_x , м/с	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$	–	$\sqrt{\frac{3}{B}}$	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$
ΔT_x , К	–	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$	$\sqrt{\frac{3/5}{B}}$	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$

Примітка. Сірим виділено найменше значення; жирними рамками позначено значення, яку відповідає руйнуванню струмини

Таким чином, формула (3) не дає можливості передбачити максимальну температуру в струмині при $Ar_x > 0,24$, якщо струмина рухається проти дії гравітаційних сил.

Ця проблема є відомою, хоча довідники з вентиляції подібної інформації не містять. У монографії [5] наведено експериментальні дані щодо коефіцієнтів неізотермічності (рис. 1). При значенні критерію Архімеда $Ar_x = 0,2$ відбувається відхилення від значення $K_n^t = 1/K_n$ за формулою (3). А біля значення $Ar_x = 0,24$ маємо максимум, після якого коефіцієнт неізотермічності спадає.

Дослідні дані на рис. 1 б добре описуються залежністю, яку рекомендовано для випадку руху струмини проти впливу гравітаційних сил:

$$K_n^t = (16 \cdot Ar_x^2 + 1) \cdot (1 - 6,25 \cdot Ar_x^2) \quad (18)$$

Підставляємо формули (4, 9, 10, 18) до (2):

$$\Delta T_{x,m} = A_n \cdot \frac{(256 \cdot B^2 \cdot X^4 + 100) \cdot (1 - B^2 \cdot X^4)}{100 \cdot X}, \text{ К.} \quad (19)$$

Похідна формули (19)

$$\frac{d \Delta T_{x,m}}{dX} = -A_n \cdot \frac{(448 \cdot B^4 \cdot X^8 - 117 \cdot B^2 \cdot X^4 + 25)}{25 \cdot X^2}, \text{ К/м.} \quad (20)$$

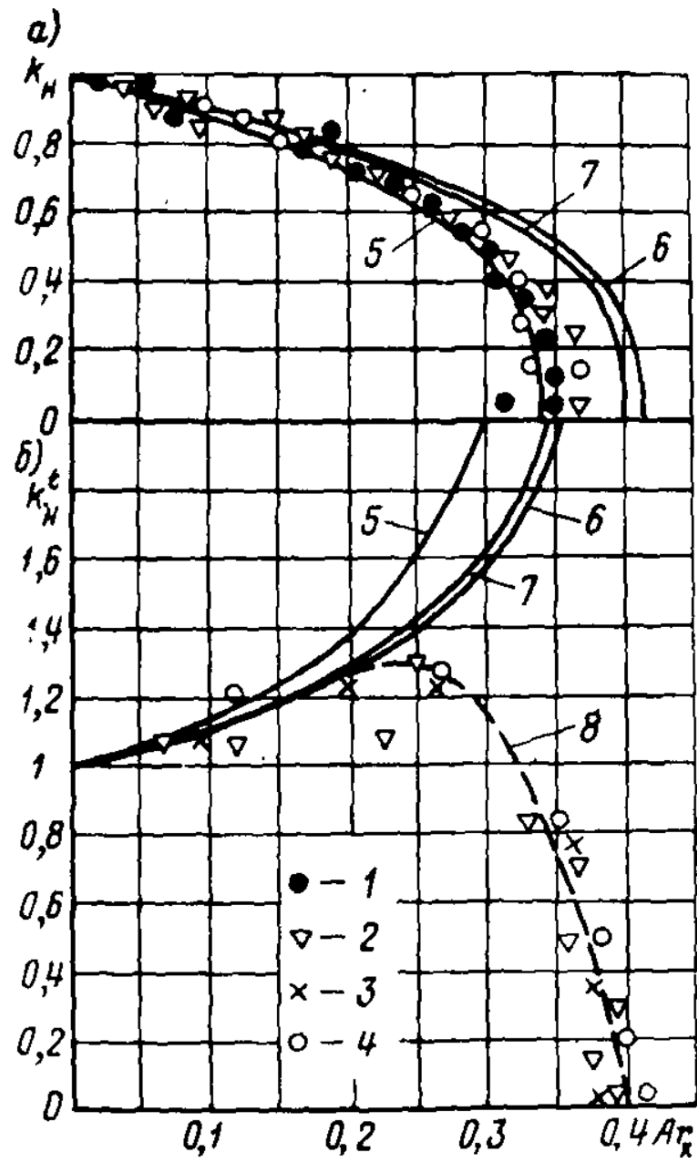


Рис. 1. Коефіцієнти неізотермічності при русі струмини проти впливу гравітаційних сил [5]:

а – для швидкості; б – для надлишкової температури:

1 – дослідні дані Хеландера; 2 – дослідні дані Кнаака; 3 – дослідні дані І. Шепелева та А. Посохіна; 4 – дослідні дані М. Гримітліна; 5 – формула І. Шепелева; 6 – формула В. Талієва; 7 – $K_n' = 1/K_n$ за формулою (3); 8 – за результатами дослідів

Вираз у дужках формули (20) є квадратним рівнянням відносно $B^2 X^4$ з від'ємним дискримінантом. Отже, похідна (20) коренів не має. При $X = 1/B^{1/2}$ похідна (20) від'ємна. Отже, температура завжди спадає, що характерно для струмин. Таким чином, формулу (18) рекомендовано до застосування для гарячих струмин, спрямованих униз, і холодних струмин, спрямованих угору.

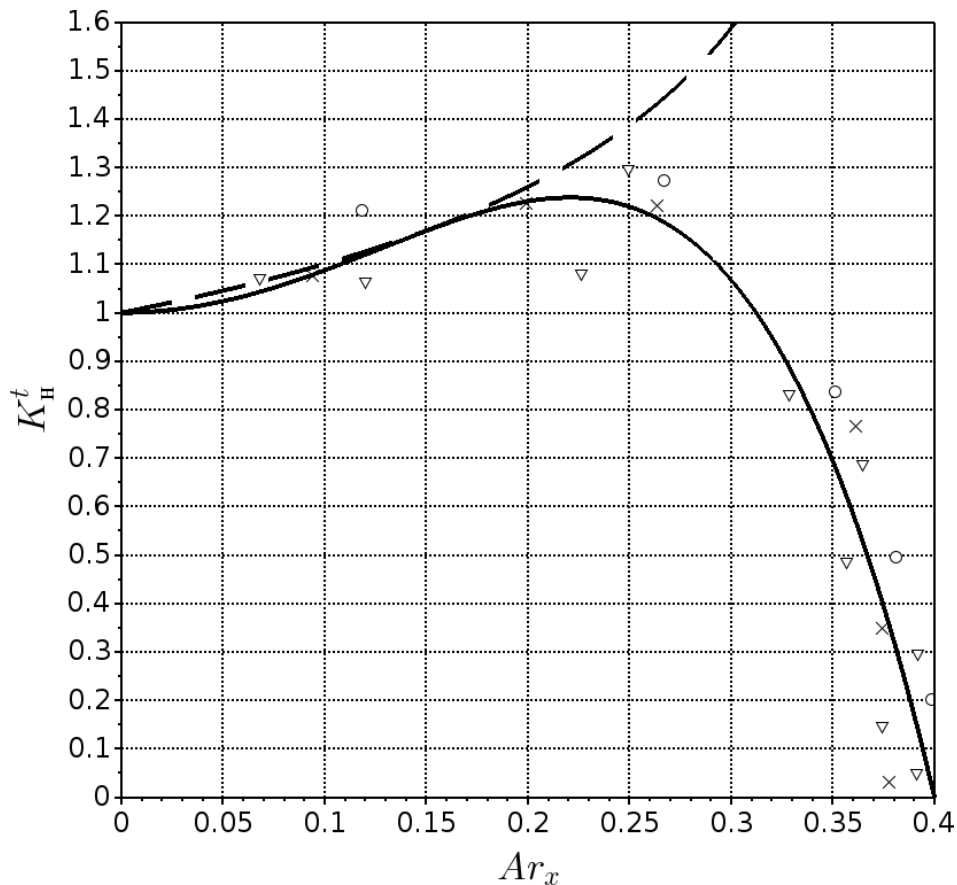


Рис. 2. Апроксимація коефіцієнта неізотермічності при русі струмини проти впливу гравітаційних сил для надлишкової температури [5]:

∇ – дослідні дані Кнаака; \times – дослідні дані І. Шепелева та А. Посохіна; \circ – дослідні дані М. Гримітліна; — — — $K_n^t = 1/K_n$ за формулою (3); суцільна лінія – формула (16)

За формулами (1-5) і (18) створено програму розрахунку струмин для SciLab, що дозволяє моделювати струмини в широкому діапазоні чисел Архімеда.

Застосування експериментального повітророзподільника для вентиляції музейної зали. У роботі запропоновано використання експериментального повітророзподільного пристрою, який утворює віялові, закручені та вісесиметричні струмини [6]. Моделювання і розрахунок виконано для приміщення виставкової зали Національного центру народної культури "Музей Івана Гончара" для трьох схем подачі повітря:

- схема А – подавання повітря згори донизу вісесиметричними струминами (рис. 3);
- схема Б – подача повітря віяловими струминами, що настилаються на стелю (рис. 4);
- схема В – подача повітря згори донизу обома типами струмини.

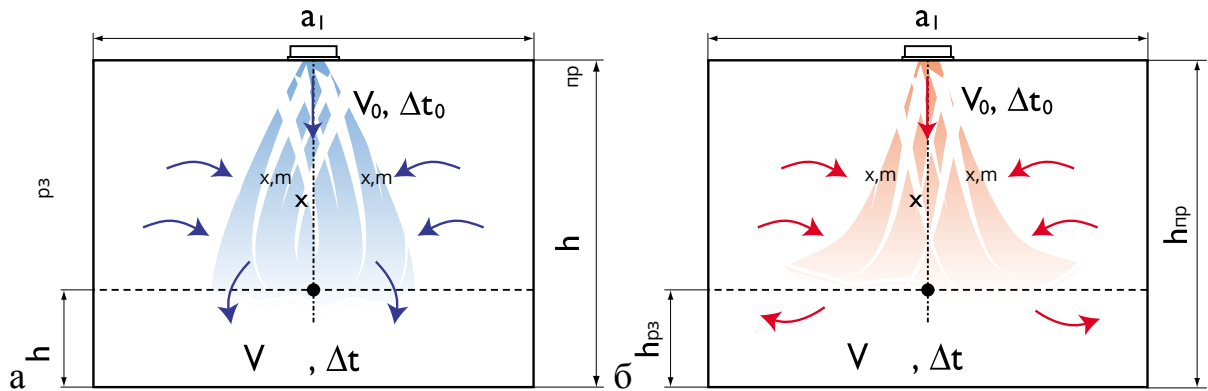


Рис. 3. Схема А подавання повітря конічною струминою:
а – охолодженою; б – нагрітою

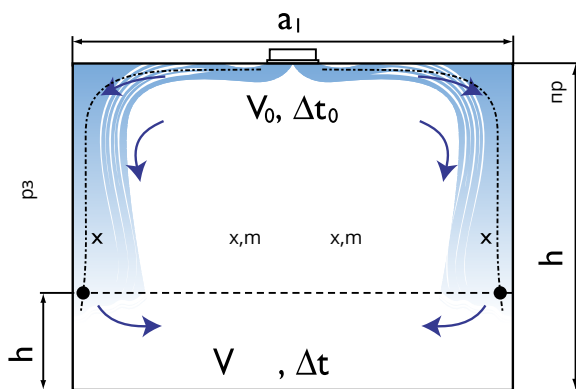


Рис 4. Схема Б подавання повітря віяловою струминою, що настиляється

Приміщення має висоту $h_{пр} = 3,7$ м і ширину $a_l = 4,6$ м. Прийнята кількість повітророзподільників – 2 шт. Витрата повітря $L = 890$ м³/год. Витрата одного повітророзподільника $L_0 = 445$ м³/год. Нормована швидкість повітря в робочій зоні $v_{норм} = 0,3$ м/с. Нормована максимальна швидкість у струмині при коефіцієнті переходу від нормованої швидкості руху повітря до максимальної у струмені $K_n = 1,2$ маємо $V_{норм} = 0,36$ м/с. Нормована надлишкова температура припливного повітря – $\Delta T_{норм} = \pm 1,0$ К. Робоча різниця температур $\Delta T_{рмн} = - 5$ К. Висота робочої зони 2,0 м. Температура припливного повітря в теплий період року $t_n = 16$ °С ($T_n = 289,15$ К). Температура в приміщенні $t_{нав} = 21$ °С ($T_{нав} = 294,15$ К).

Для кожної схеми визначаються параметри m та n експериментального повітророзподільника. Для кожного окремого способу подавання повітря приймаємо дані для повітророзподільника, що утворює таку ж струмину.

Для конічних струмин приймаємо дані дифузора круглого типу ДПУ-К Ø250:

- коефіцієнт затухання швидкості $m = 2,0$;
- коефіцієнт затухання надлишкової температури $n = 1,7$;
- площа випуску повітря $F_0 = 0.015$ м²;

Максимальна початкова швидкість при продуктивності 100 % становить 8,24 м/с.

Для віялових струмин приймаємо дані того ж дифузора круглого типу ДПУ-К Ø250:

- коефіцієнт затухання швидкості $m = 2,1$;
- коефіцієнт затухання надлишкової температури $n = 1,8$;
- площа випуску повітря $F_0 = 0.064 \text{ м}^2$;

Максимальна початкова швидкість при продуктивності 100 % становить 1,93 м/с.

Коефіцієнт взаємодії $K_{\text{вз}}$ прийнято 0,9.

Розрахункову довжину струмини для схеми А визначаємо як відстань від стелі до входу до робочої зони заввишки $h_{\text{pz}} = 2 \text{ м}$ за формулою

$$X = h_{\text{np}} - h_{\text{pz}} = 1,7 \text{ м.} \quad (1)$$

Розрахункову довжину струмини для схеми Б визначаємо як відстань від стелі до входу до робочої зони заввишки $h_{\text{pz}} = 2 \text{ м}$ плюс відстань від повітророзподільника до стіни $a_1/2$ (або половину відстані до сусіднього повітророзподільника, якщо він не один):

$$X = (h_{\text{np}} - h_{\text{pz}}) + (a_1/2) = 4,0 \text{ м.} \quad (2)$$

Визначаємо максимальну швидкість $V_{x,m}$, м/с, і надлишкову температуру на цій відстані та порівнюємо з нормативним значенням (рис. 5). Бачимо, що схема А застосовна лише для витрати повітря 25 % від розрахункової через перевищення нормативної швидкості. Натомість, схема Б при цій витраті (рис. 6) забезпечує швидкість повітря на вході струминних течій до робочої зони біля 0,2 м/с.

Подавання нагрітих струмин з робочим перепадом температури 5 К за схемою Б дає перевищення числа Архімеда за будь-якого режиму витрати. Отже, струмина спливає з порушенням циркуляції повітря. Схема А має дуже вузький діапазон регулювання (рис. 7) – від 25 до 37,5 %. Збільшення витрати повітря вимагатиме регулювання (збільшення) площі випуску повітря з повітророзподільників.

Моделювання методами обчислювальної гідродинаміки. На основі проведених розрахунків було виявлено, що зміна кількості повітря при подаванні охолоджених струмин мало впливає на температуру повітря на вході до робочої зони ($\Delta T < 1 \text{ К}$). Для підтвердження цього виконано математичне моделювання руху повітря в приміщенні на підставі стандартної к-ε моделі.

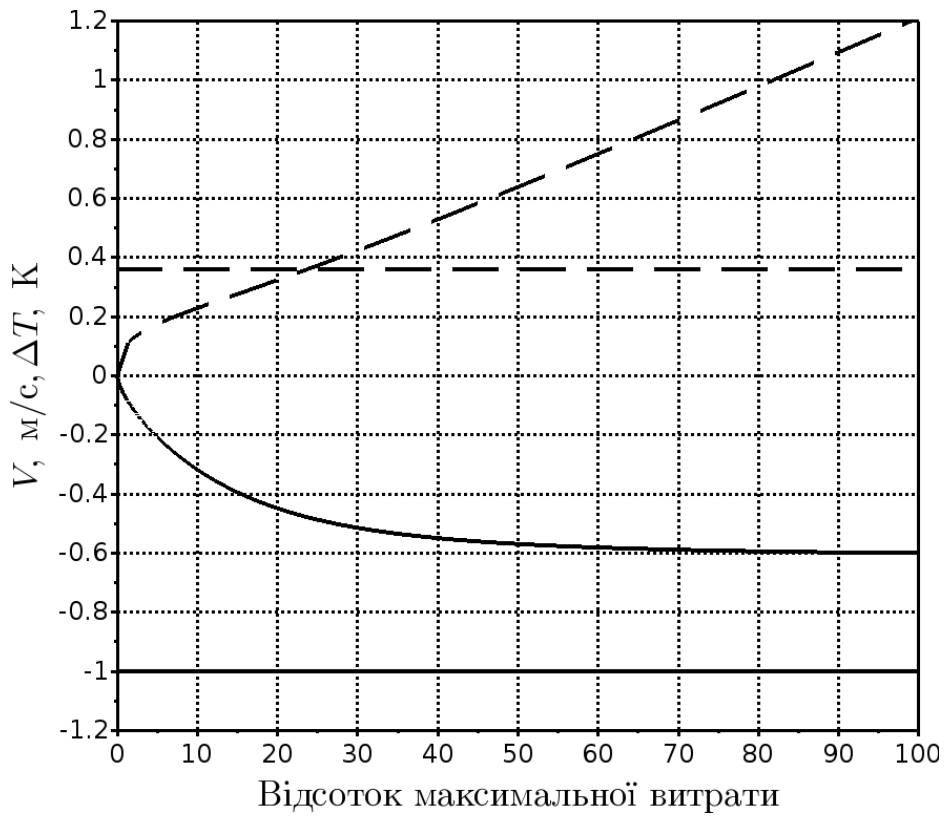


Рис 5. Параметри струмини на вході до робочої зони за схемою А:
— — — швидкість V , м/с, — — надлишкова температура ΔT , К, м/с

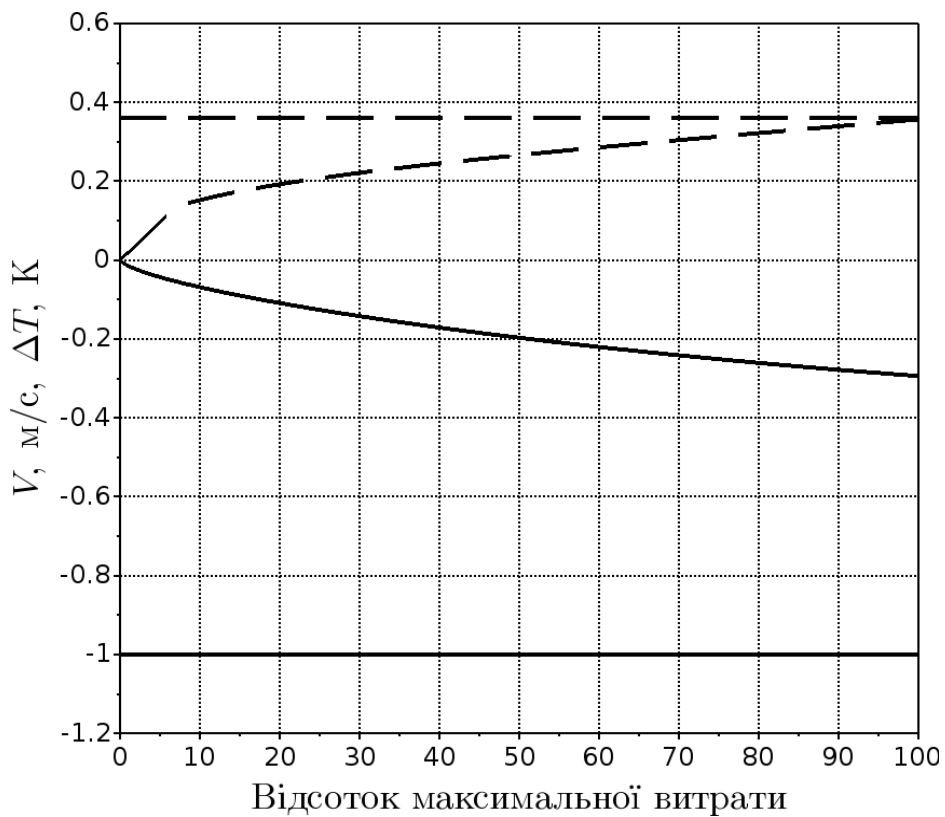


Рис 6. Параметри струмини на вході до робочої зони за схемою Б:
— — — швидкість V , м/с, — — надлишкова температура ΔT , К, м/с

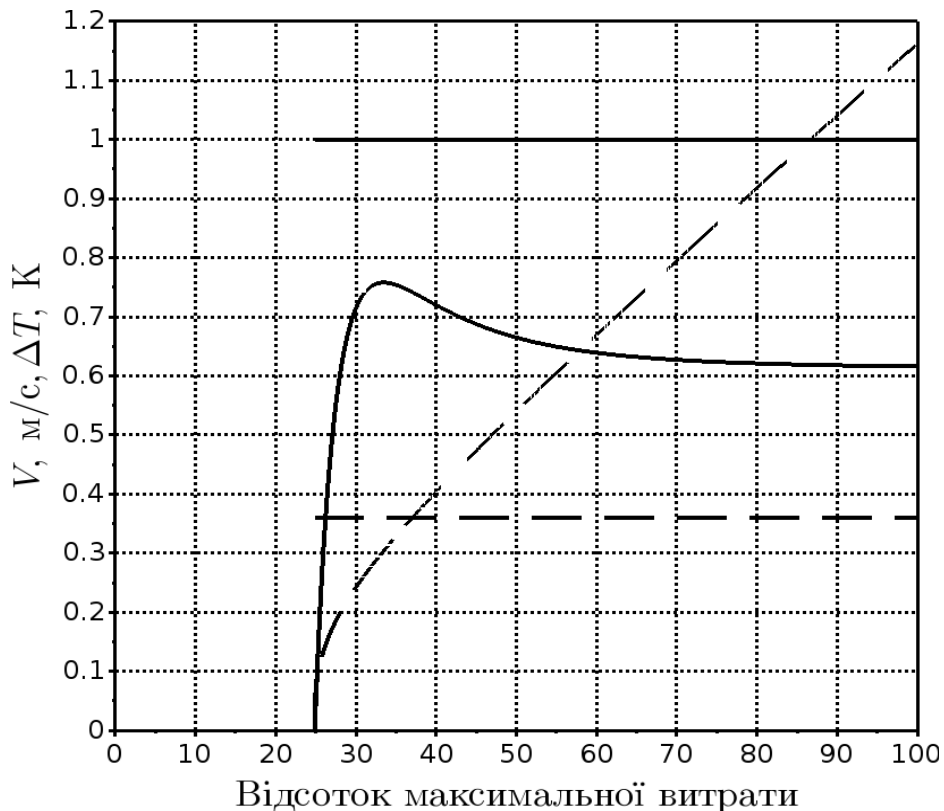


Рис 7. Параметри струдини на вході до робочої зони за схемою А при подаванні нагрітої струдини:

— — — швидкість V , м/с, — — надлишкова температура ΔT , К, м/с

Для створення математичної моделі повітряних потоків було обрано три схеми подачі повітря: Б та В. Для приміщення виставкової зали виконано моделювання розподілу температури, швидкості та відносної вологості повітря на висоті 1,5 м (місце розміщення картин) [3, 6]. З рис. 8-19 видно, що параметри повітря відповідають нормативним. Це підтверджує як результати розрахунку, так і правильність обраних схем подавання повітря.

Висновки. Математичне моделювання розвитку струмин за аналітичними залежностями та методами обчислювальної гідродинаміки показали, що подача повітря охолодженою віяловою струминою з робочим перепадом температури 5 К за схемою Б забезпечує оптимальні параметри мікроклімату в робочій зоні музейної зали. Подача нагрітого повітря цим способом повністю порушує режим циркуляції, через спливання струмини. Зменшення навантаження вимагає зміни струмини на вісесиметричну з подальшим регулюванням площі випуску повітря залежно від продуктивності системи. Подача охолодженого повітря вісесиметричною струминою за схемою А доцільне лише при зменшенні навантаження до 25% і менше.

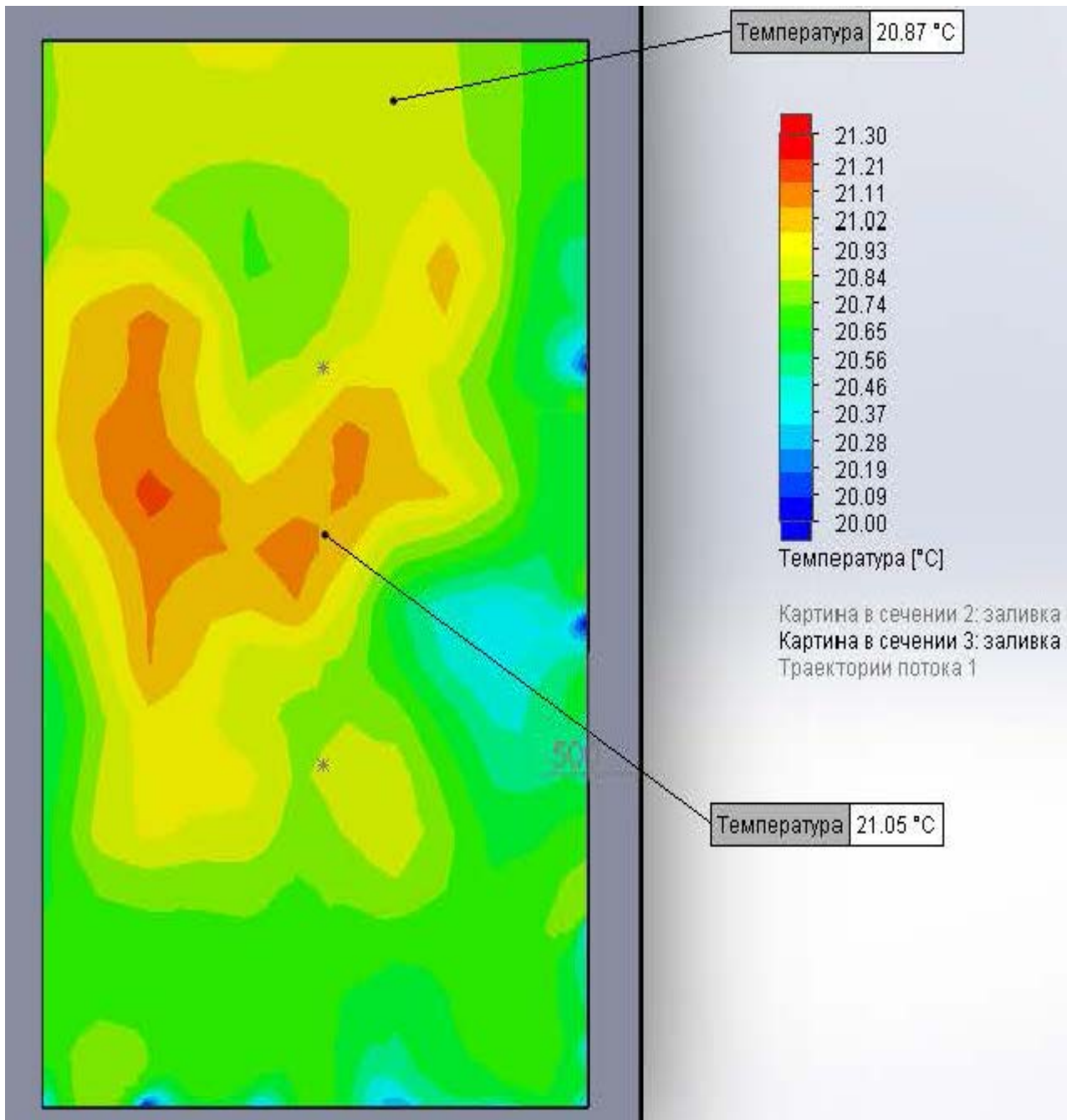


Рис 8. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100%, схема подачі повітря Б

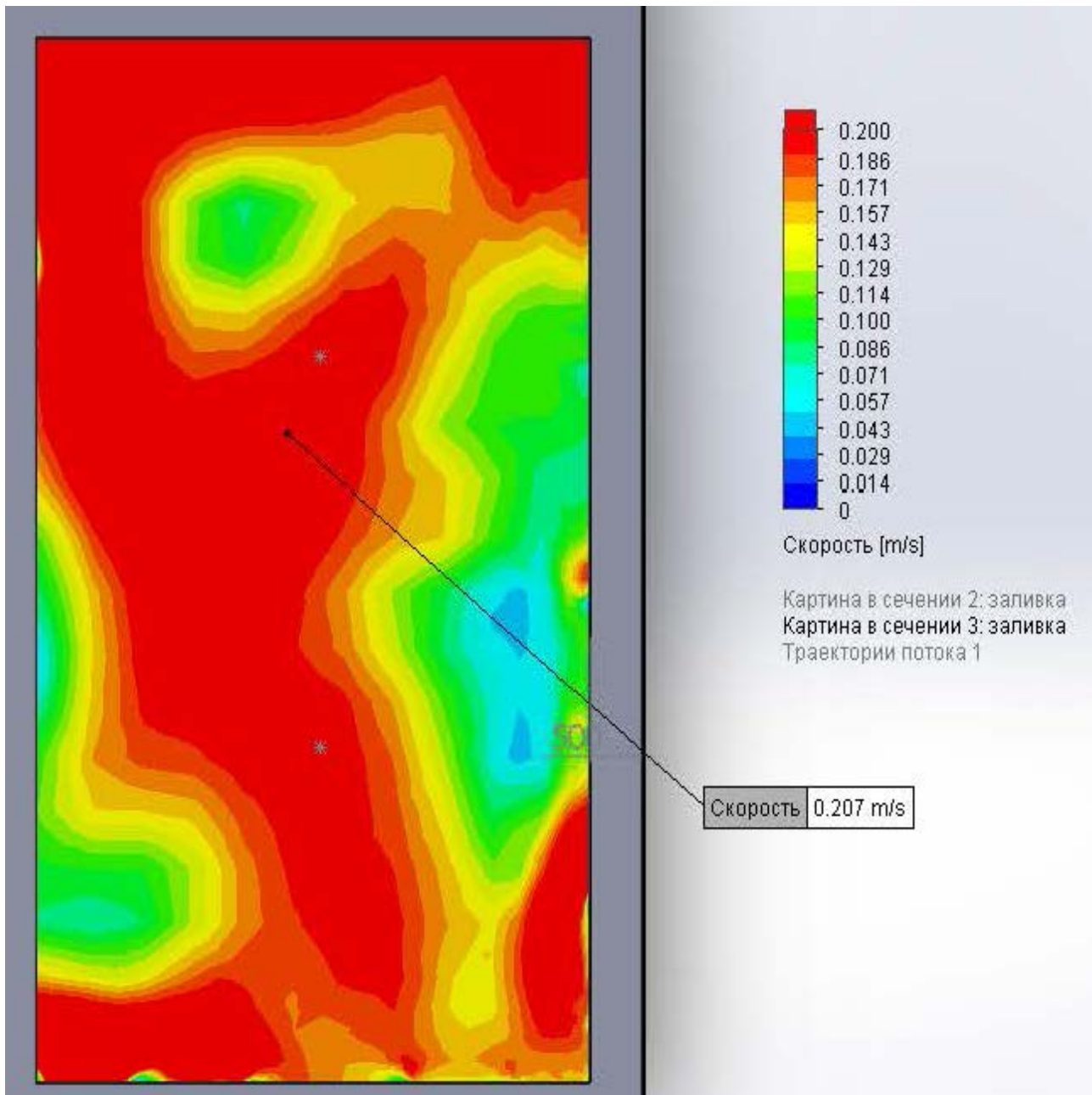


Рис 9. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100%, схема подачі повітря Б

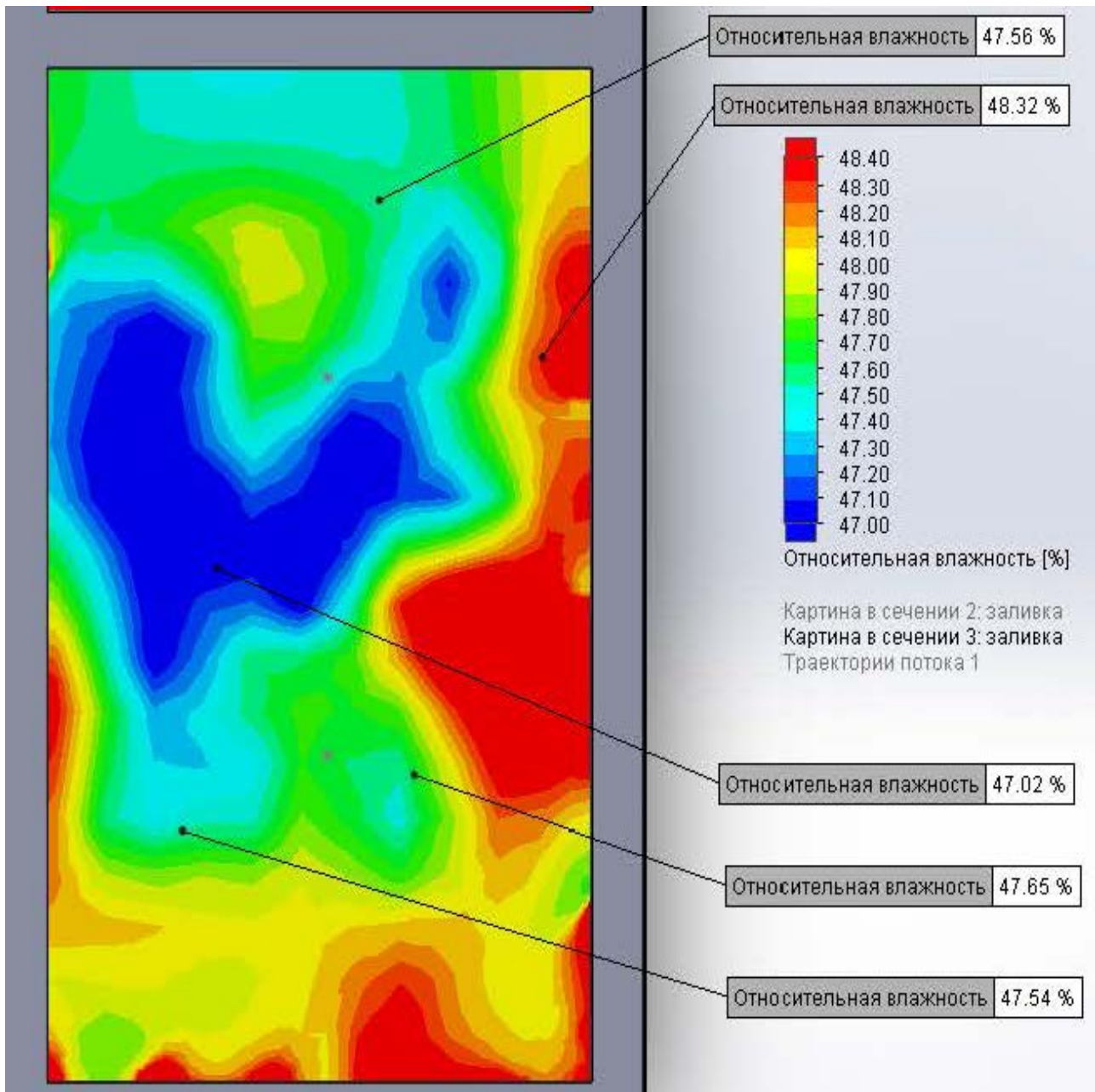


Рис 10. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100%, схема подачі повітря Б

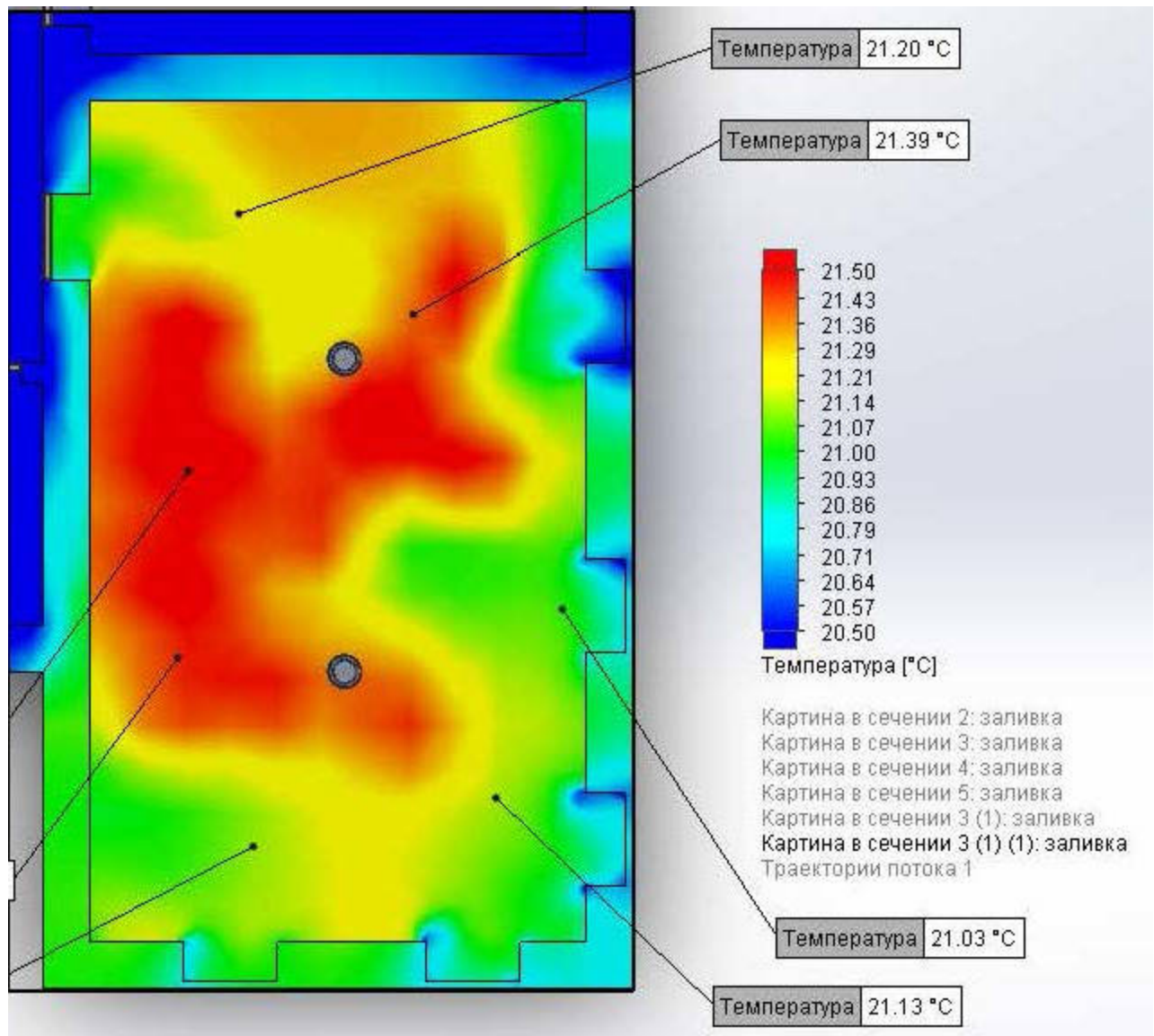


Рис 11. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря Б

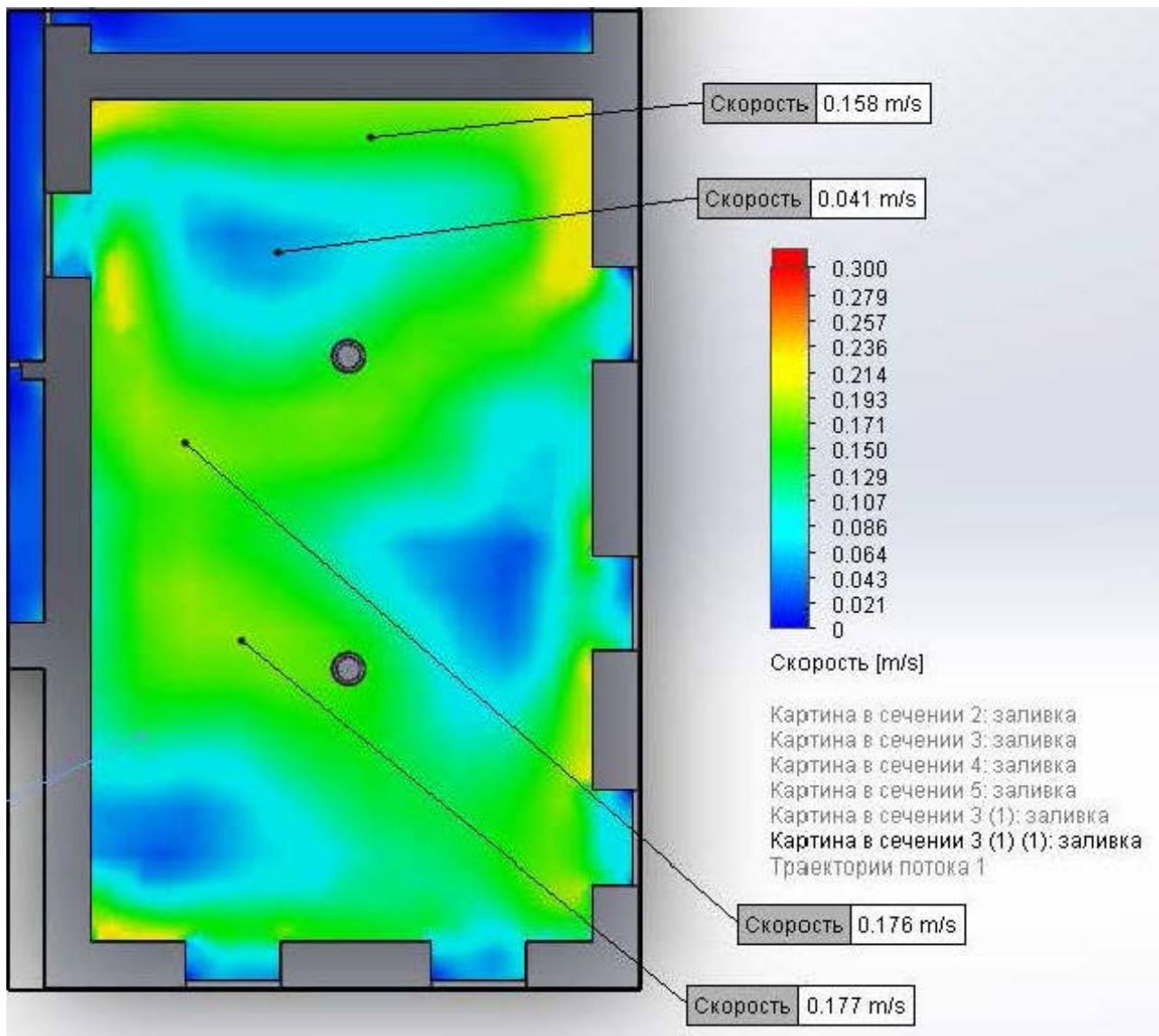


Рис 12. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря Б

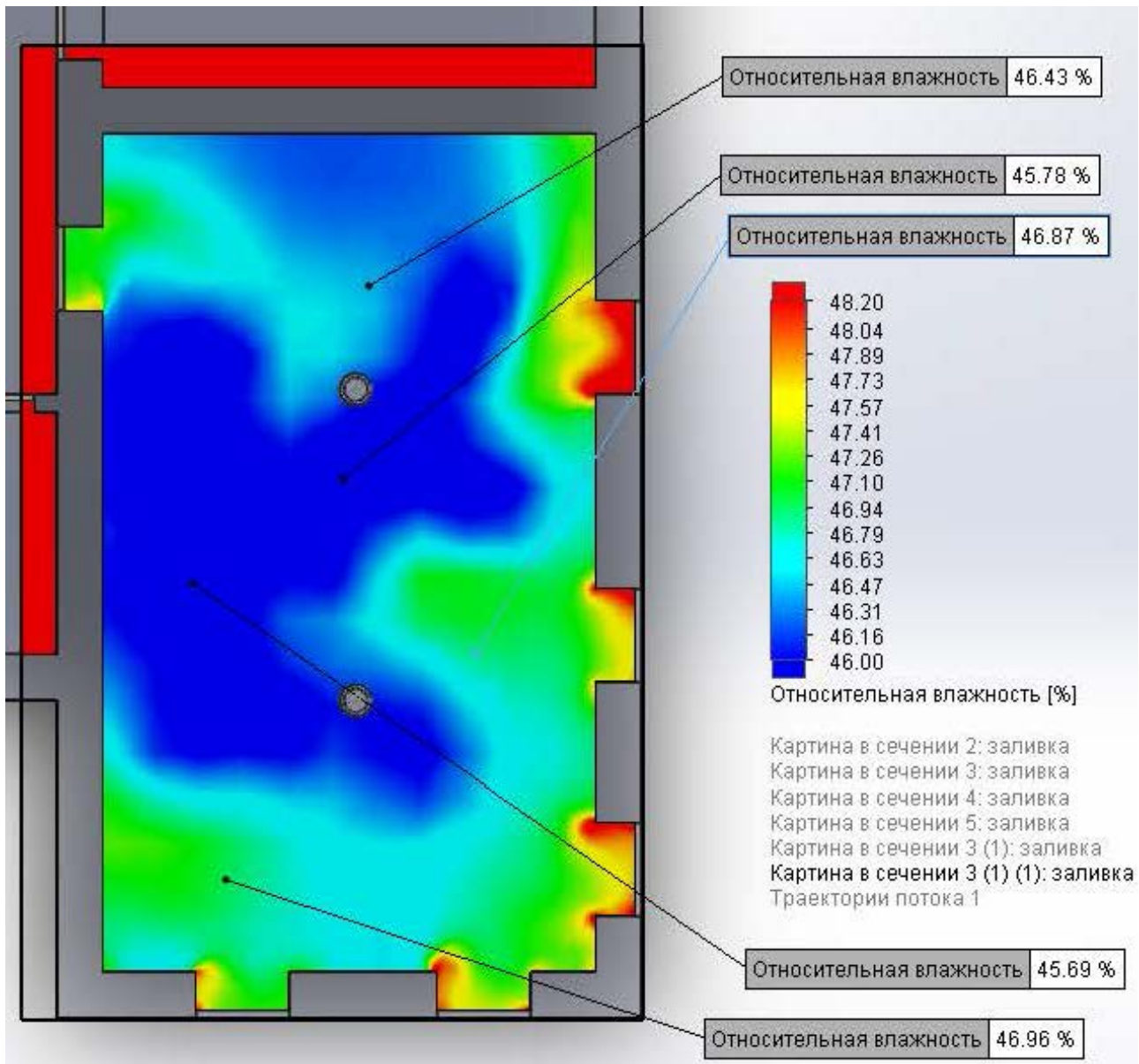


Рис 13. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря Б

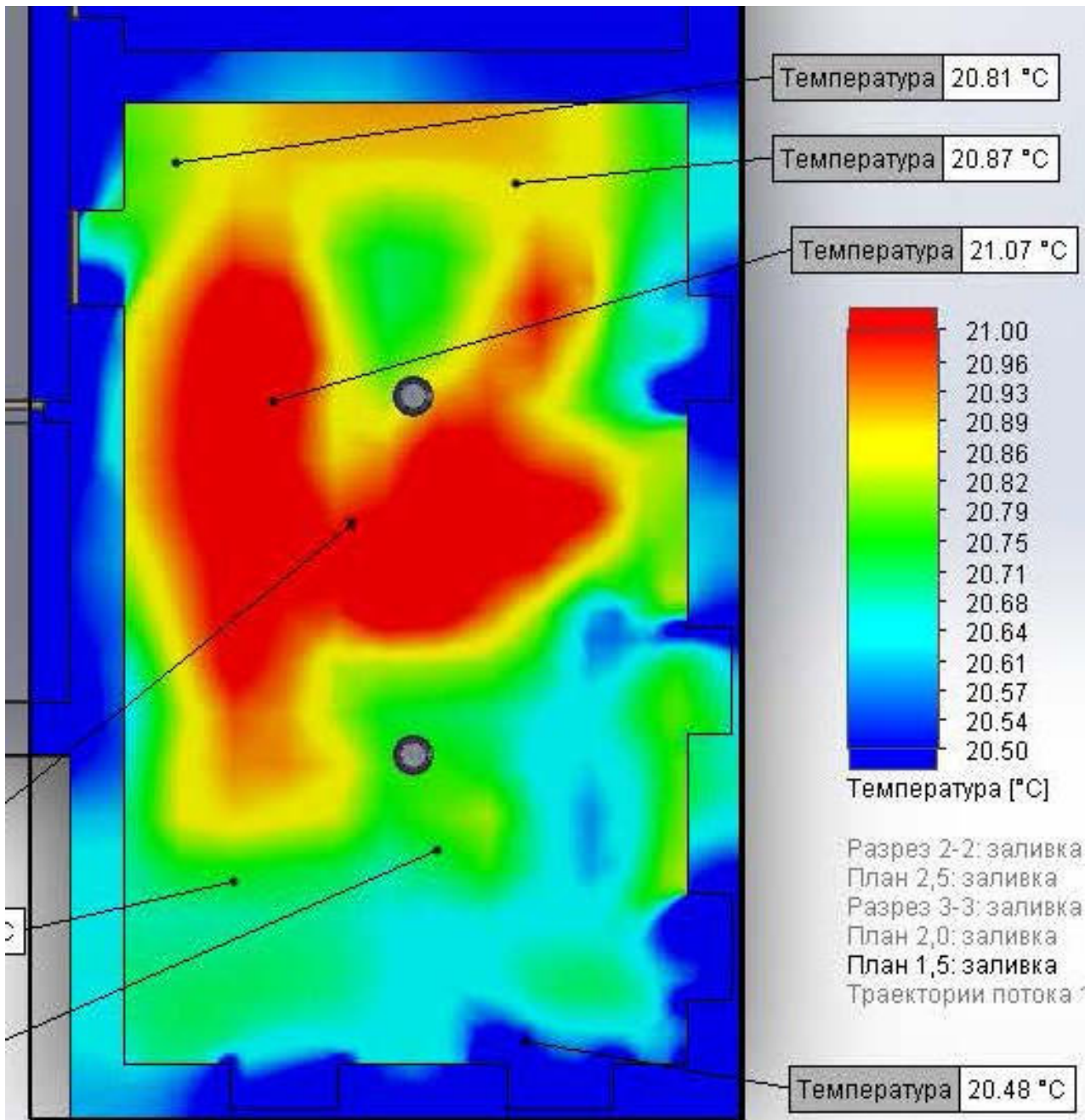


Рис 14. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100 %, схема подачі повітря В

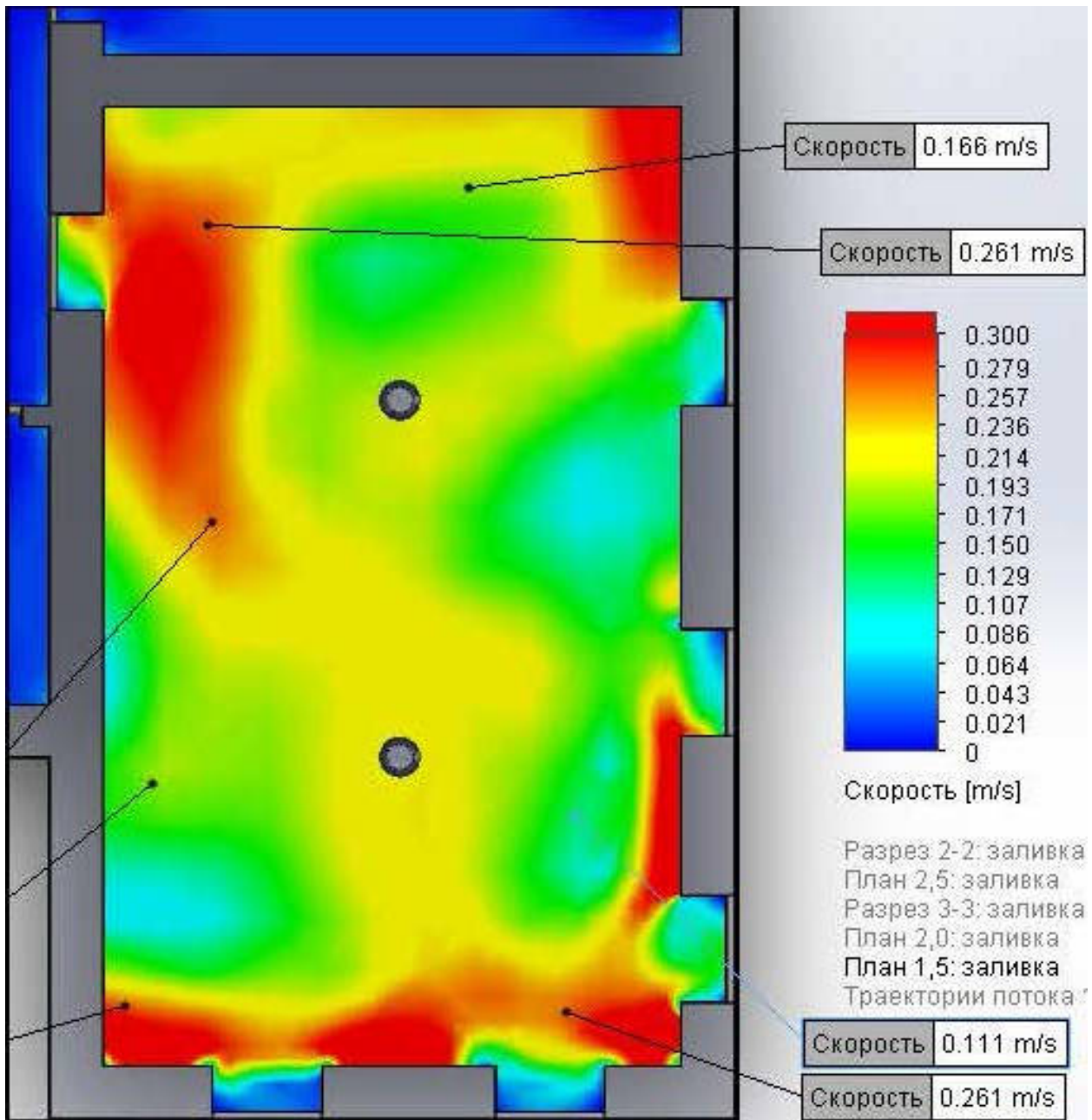


Рис 15. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100 %, схема подачі повітря В

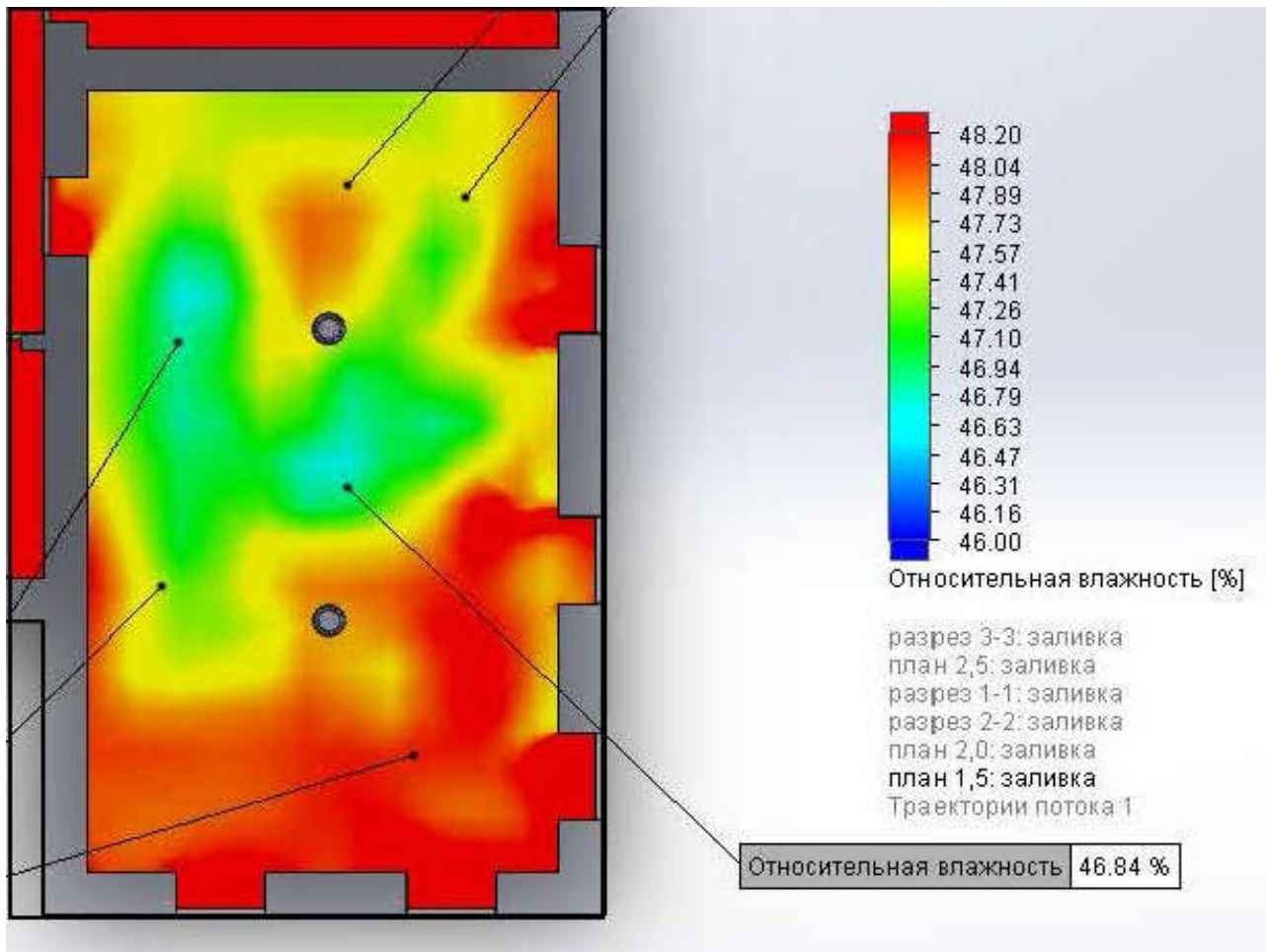


Рис 16. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100 %, схема подачі повітря В

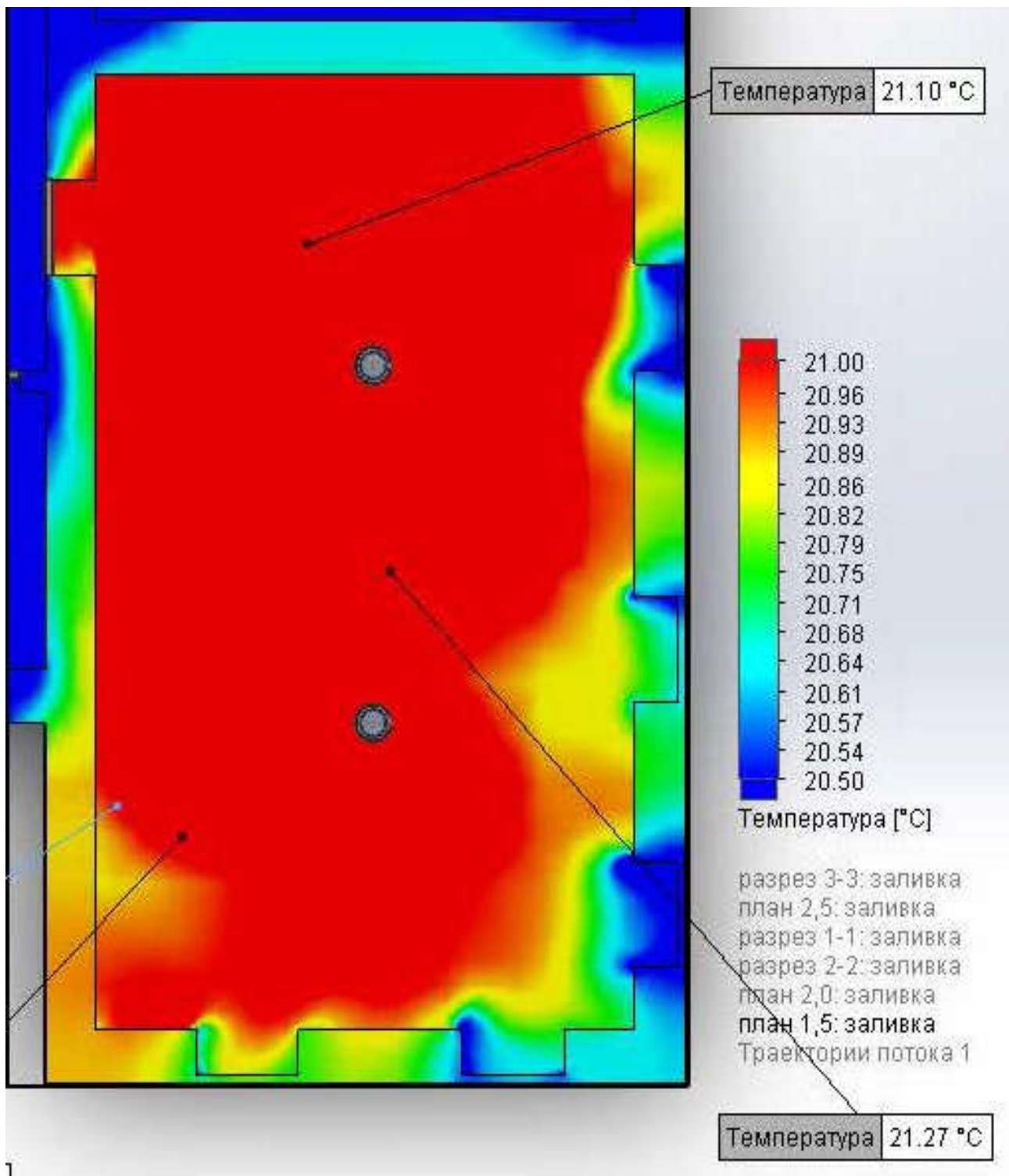


Рис 17. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря В

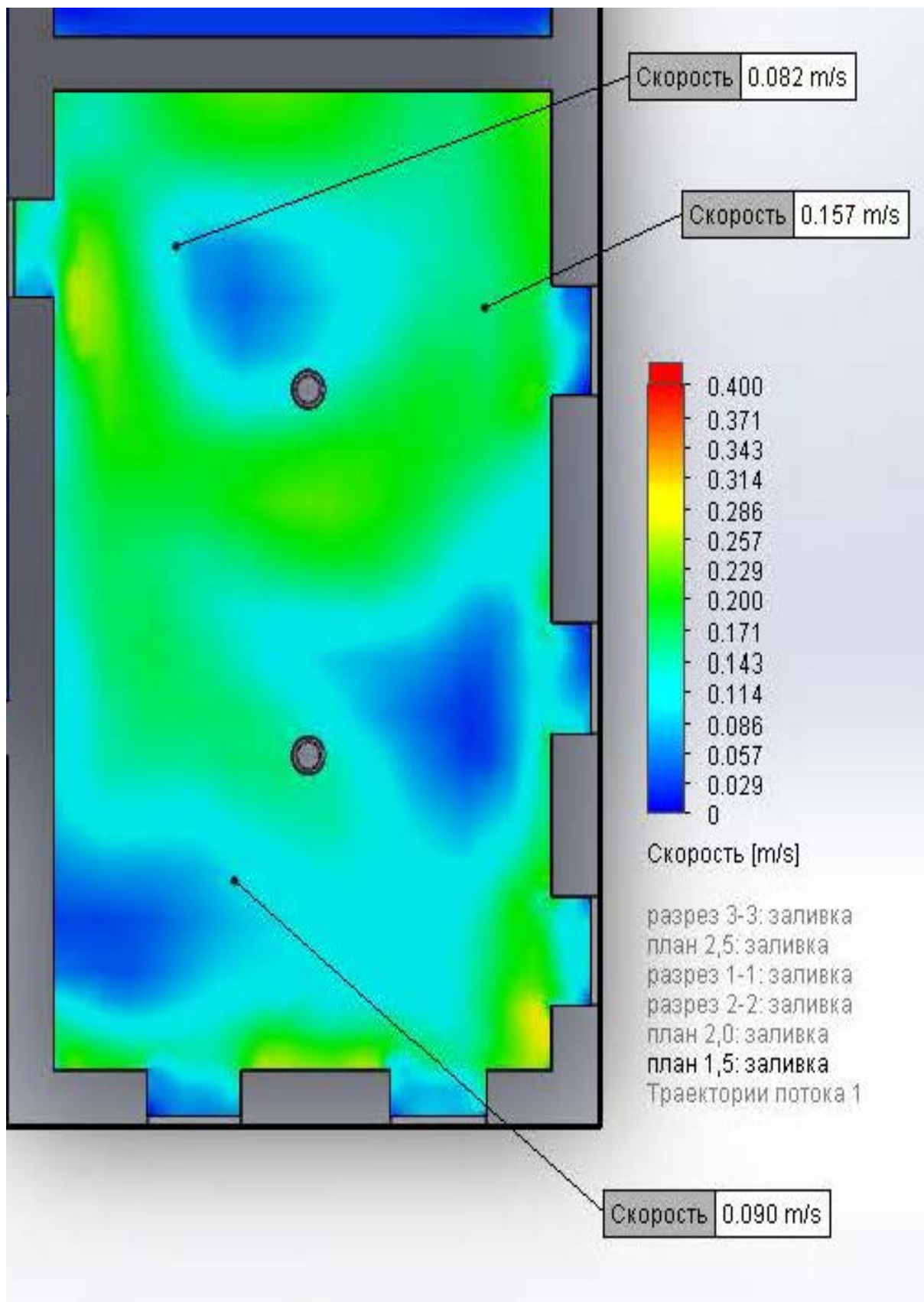


Рис 18. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря В

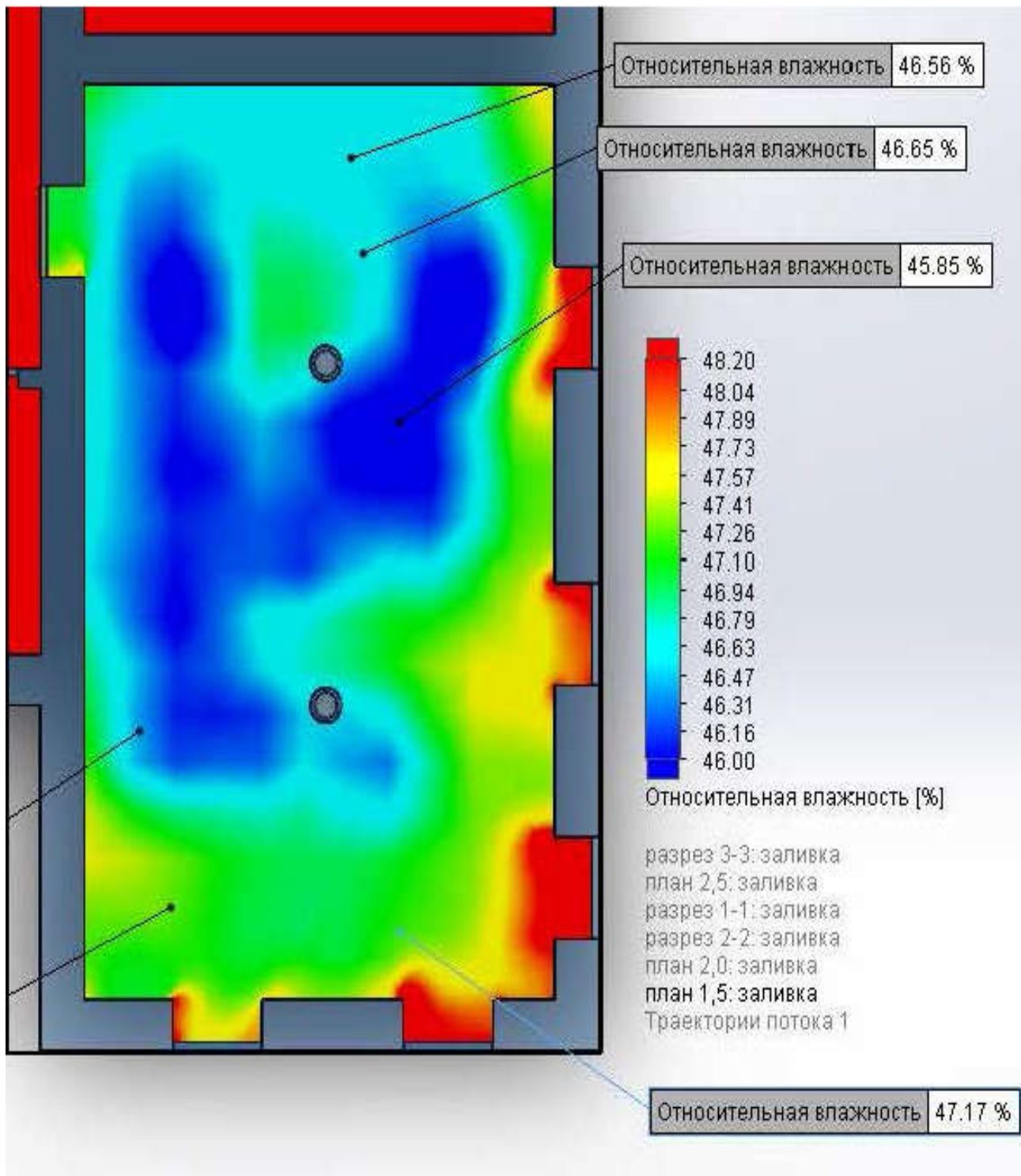


Рис 19. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря В

References

1. Dovhaliuk V.B., Komarenko O.I., Mytkivska T.I. Mikroklimat muzeinykh prymishchen. Artaniia Nova, 2006. (In Ukrainian).
2. Dovhalyuk V.B., Chovnyuk Yu.V., Sklyarenko O.M., Sytnytska A.K. “Enerhoefektyvni tekhnolohiyi orhanizatsiyi povitrorozpodilu v muzeyakh riznoho pryznachennya pry zminnykh rezhymakh teplovologonadhozhennya”. Ventylyatsiya, osvittlennya ta teplogazopostachannya: nauk.-tekhn. zb., iss. 32, 2020. – Vyp. 32, pp. 6-16 (in Ukrainian).
3. Sukholova I., Vozniak O. “Modeliuvannia povitrorozpodilu v prymishchenni u zminnomu rezhymi za dopomohoiu modeli turbulentnosti Spalarta-Almarasa”. Visnyk NU “LP” “Teoriia i praktyka budivnytstva”, iss. 844, 2016, pp. 26-33 (in Ukrainian).
4. Dovhaliuk V. Aerodynamika ventyliatsii. Ukrheliotekh, 2020 (in Ukrainian)
5. Grymitlin M. Raspreделение vozdukhа v pomesheniakh. Stroizdat, 2020 (in Russian)
6. Vozniak O. “Vplyv vzaiemodii strumyn na povitrorozpodil u prymishchenni”. Visnyk NU «Lvivska Politekhnika» Teploenerhetyka, inzheneriia dovkillia, avtomatyzatsiia, 2001. pp 27-31 (in Ukrainian)
7. Vakhula V. R. “Proektuvannya systemy vytisnyayuchoyi ventyliatsiyi v muzeynykh prymishchennyakh”. Ventyliatsiia, osvittlennya ta teplogazopostachannya, iss. 44, 2023, pp. 5-11 (in Ukrainian)

professor **Viktor Mileikovskiy**,
mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8543-1800
assistant **Volodymyr Vakhula**,
v.vahula@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-6421
assistant **Oleksii Dudnikov**,
dudnikov.oa@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-2656-2683
Kyiv National University of Construction and Architecture

THEORETICAL STUDIES OF AIR EXCHANGE ORGANISATION USING MULTI-FLOW AIR DISTRIBUTORS

***Abstract.** One of the most important aspects of ensuring optimal conditions in museums is the air conditioning systems. Traditional ventilation and air conditioning systems with a constant air flow rate may not be effective. In the context of optimising the microclimate in museums, it is crucial to implement technological standards and requirements aimed at stabilising the temperature and humidity conditions. It is important to note that the conditions for the preservation of museum exhibits require*

that the temperature (16-24 °C, optimally 18-22 °C) and humidity (55% ± 5%) regimes remain constant. Multi-jet air distributors in variable flow systems are one of the modern approaches that can provide optimal parameters for museum premises. The paper considers theoretical studies of a multi-jet air distributor that can create axisymmetric and fan-like jets, as well as combine these jets together. The formula for the coefficient of non-isothermicity of the jets fed vertically against the influence of gravitational forces was refined in accordance with experimental data. Three schemes of air supply vertically downward were modelled: axisymmetric jet, fan-like jet, and both jets. For the exhibition hall, the distribution of temperature, air velocity and relative humidity at a height of 1.5 m (the place where the paintings are placed) was modelled. The results showed that the supply of a compact cool jet is effective only at an air flow rate of 25 %. The supply of a fan-shaped cooled jet ensures that the air parameters are within the standard range. The heated fan-like jet floats away and does not reach the working area. The heated axis-symmetric jet requires adjustment of the air outlet area. The results allow recommending air supply by cooled fan-shaped jets from 25 to 100 %. For lower flow rates, the axis-symmetrical jets are more appropriate. Heated jets should be axis-symmetrical with enough control of the initial area.

Key words: *multi-jet air distributor, museum, microclimate, ventilation, air conditioning, variable air flow, regulation degree, mathematical model.*

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 49

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 31.05.2024. Формат 60×84 1/16
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 4,76. обл. вид. арк. 5,00.
Наклад 100 прим. Замовлення № 161407

