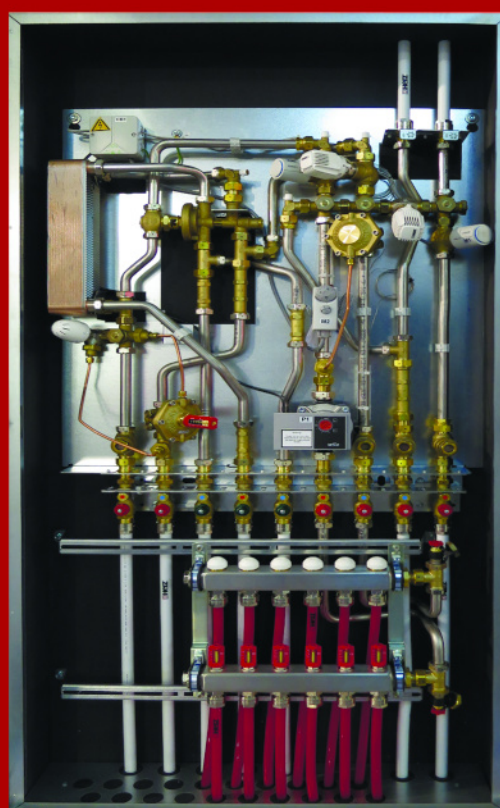




# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



Міжнародна  
науково-практична конференція  
«Довкілля, ресурси, енергія»  
ERE-2020  
25-26 листопада 2020 року

Випуск 35  
Київ 2020

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 35

Kyiv 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

# **ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*заснований у 2001 році*

ВИПУСК 35

Київ 2020

УДК 697  
В29

ISSN 2409-2606

**Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:** науково-технічний збірник. – Вип. 35 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2020. – 58 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, доцент В. О. Мілейковський (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Михайленко; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. екон. наук, доцент К. М. Предун; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професор Т. М. Ткаченко; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, ст. наук. співр. Г. В. Жук; докт. техн. наук, професор В. А. Кравець; докт. техн. наук, професор Г. Гавардашвілі (Грузія); докт. техн. наук, професор З. Гвішані (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 17 грудня 2020 р., протокол № 36.

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

## ЗМІСТ

<i>До відома авторів і читачів.....</i>	<i>5</i>
М. П. Сенчук <i>Комбінована схема спалювання твердого палива в опалювальних котлах малої потужності.....</i>	<i>6</i>
Б. І. Басок, М. П. Новіцька, С. М. Гончарук <i>Теплофізичне моделювання та дослідження теплотехнічних характеристик водяної теплої підлоги сухого способу укладання.....</i>	<i>15</i>
Ю. О. Бурда, А. Д. Череднік, І. О. Редько, Ю. О. Півненко <i>Підвищення ефективності очищення газових викидів від ливарного виробництва.....</i>	<i>21</i>
Г. С. Ратушняк, О. Ю. Горюн, А. О. Лялюк <i>Моделювання теплопередачі у вузлі примикання горючого перекриття до зовнішніх огорожувальних конструкцій.....</i>	<i>26</i>
Т. М. Ткаченко, Ю. Г. Пількевич, В. О. Мілейковський <i>Високоточний ядерно-квадрупольно-резонансний термометр для аерогідродинамічних досліджень.....</i>	<i>34</i>
О. М. Недбайло, І. К. Божко, М. В. Ткаченко, С. В. Андрейчук <i>Чисельне моделювання параметрів повітряно-грунтових теплообмінників для геотермальної вентиляції.....</i>	<i>41</i>
Т. І. Кривомаз, Д. В. Варавін, Р. В. Сіпаков, Р. С. Кузьмішина <i>Оцінка впливу систем вентиляції на мікробіологічну безпеку та мікрокліматичні умови приміщень.....</i>	<i>49</i>

## CONTENTS

<i>Information for the authors and the readers</i> .....	5
M. P. Senchuk <i>Combined scheme of solid fuel combustion in low power boilers (in Ukrainian)</i> .....	6
B. Basok, M. Novitska, S. Goncharuk <i>Numerical simulation and study of thermal characteristics of a lightweight floor heating system (in Ukrainian)</i> .....	15
Y. Burda, A. Cherednik, I. Redko, Y. Pivnenko <i>Improving the efficiency of cleaning gas emissions from foundry (in Ukrainian)</i> .....	21
G. Ratushnyak, O. Horiun, A. Lialiuk <i>Simulation of heat transfer at the junction of the attic floor to the building envelope (in Ukrainian)</i> .....	26
T. Tkachenko, Yu. Pylkevych, V. Mileikovskiy <i>High-precision nuclear-quadrupole-resonance thermometer for aerohydrodynamic research (in Ukrainian)</i> .....	34
O. Nedbailo, I. Bozhko, M. Tkachenko, S. Andreychuk <i>Numerical modelling of parameters of the operational parameters of an earth-to-air heat exchanger for geothermal ventilation (in Ukrainian)</i> .....	41
T. Kryvomaz, D. Varavin, R. Sipakov, R. Kuzmishina <i>Impact Assessment of the ventilation systems on microbiological safety and microclimatic conditions of premises (in Ukrainian)</i> .....	49

## До відома авторів і читачів

Шановні автори, рецензенти та читачі науково-технічного збірника “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”.

З глибоким сумом сповіщаємо, що на 64-му році життя незабаром після затвердження наукового ступеня доктора технічних наук раптово помер головний редактор Збірника, завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури, відомий вчений, педагог, професор Володимир Борисович Довгалиук. Для всіх нас це непоправна втрата. За час його керування значно розвинувся науковий потенціал кафедри, було оновлено всі наявні лабораторії та відкрито нові, отримано сучасну вимірювальну та обчислювальну техніку, захищено кандидатські та докторські дисертації. Володимир Борисович успішно розвинув на кафедрі дуже актуальну для всього світу, тематику формування мікроклімату задля збереження музейних цінностей з урахуванням змінного режиму їхньої експлуатації. Наш науково-технічний збірник було піднято на новий міжнародний рівень з долученням його до міжнародних наукометричних баз та отриманням ідентифікатора DOI.

Висловлюємо співчуття всім рідним, близьким і колегам.

Продовжуємо публікацію статей за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції “Довкілля, ресурси, енергія” ERE-2020 факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.



## Information for the authors and the readers

We are deeply saddened to announce that at the age of 64, shortly after the approval of the degree of Doctor of Technical Sciences, the Editor-in-Chief of the Collection, Head of the Department of Heat-Gas Supply and Ventilation of Kyiv National University of Construction and

Architecture, famous scientist, teacher, Professor Volodymyr Dovhaliuk died suddenly. For all of us, this is an irreparable loss. During his supervision, the scientific potential of the department has significantly developed, all existing laboratories have been renovated and new ones opened, modern measuring and computer equipment has been obtained, and candidate and doctoral theses have been defended. At the department, Volodymyr successfully developed the topic of forming a microclimate for the preservation of museum values, taking into account the changing mode of their operation, which is very relevant for the whole world. Our scientific and technical collection was raised to a new international level by joining it to international scientometric databases and obtaining DOI.

We express our condolences to all relatives, friends, and colleagues.

In the issue, we continue the publication of articles on the materials of the International scientific and practical conference “Environment, Resources, Energy” ERE-2020 of Engineering Systems and Ecology Department, Kyiv National University of Construction and Architecture.

УДК 697.432

## Комбінована схема спалювання твердого палива в опалювальних котлах малої потужності

М. П. Сенчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

***Анотація.** Розглянуто різні конструктивні схеми спалювання твердого палива в опалювальних водогрійних котлах до 100 кВт з аналізом їхньої ефективності. З метою зниження капітальних і експлуатаційних затрат доцільне промислове впровадження порівняно недорогих зразків опалювальних котлів малої теплопродуктивності з прийнятним рівнем механізації технології спалювання дешевого, в тому числі місцевого палива, з мінімальними затратами на його підготування. Запропоновано конструкцію опалювального водогрійного котла з напівмеханічною топкою, технологічна схема спалювання якої поєднує процеси сушіння, газифікації і горіння палива в шахті із затисковою решіткою та вигорання коксу в шарі на обертовій колосниковій решітці. Відмічено, що за періодичної подачі палива в топці з обертовою колосниковою решіткою підтримується стабільність процесу горіння в камері згорання в період між чищеннями від золи й шлаку без значної зміни складу надшарових газів. Завдяки плавному переміщенню на обертовій колосниковій решітці порції розжареного коксу з паливної шахти в топкову камеру створюються умови для підтримання рівномірності роботи котла з нормативними показниками. Зниження шкідливих викидів у відхідних газах при спалюванні реакційного палива досягається подачею через колектор вторинного дуття повітря в зону горіння легких речовин на виході із затискової решітки. Наведено аналітичні рівняння визначення розмірів зони горіння за режимними й конструктивними параметрами процесу спалювання. Ефективність застосування в малопотужних котлах комбінованої (шахтно-шарової) технологічної схеми перевірено під час випробувань спалювання вугілля різної якості в напівмеханічній топці з обертовою колосниковою решіткою в складі електровугільного котла теплопродуктивністю 50 кВт для залізничних вагонів.*

***Ключові слова:** комбінована схема спалювання, шахтно-шарова схема, опалювальний водогрійний котел, твердопаливний котел, напівмеханічна топка, обертова колосникова решітка, тверде паливо*

**Вступ.** Застосування побутової опалювальної техніки потужністю до 100 кВт на твердому паливі в автономних центральних або в індивідуальних системах опалення є економічно доцільним. Виробництво таких котлів розвинуте як у багатьох країнах світу, так і в Україні. На промисловому ринку виробниками пропонуються різноманітні твердопаливні водогрійні опалювальні котли потужністю до 100 кВт, які відрізняються за конструктивними й функціональними ознаками. У топкових камерах котлів реалізовано різні схеми організації спалювання. Вони пов'язані з напрямками потоків палива і первинного дуттьового повітря: протитечійна, прямотечійна, поперечна. Обслуговування твердопаливних топок (подача палива, шування шару палива, видалення золи й шлаку) виконують вручну або механізованим способом для окремих або всіх операцій. Найвні промислові конструкції такого класу водогрійних котлів призначені в основному для спалювання окремих видів твердого палива: вугілля, торфу, деревини та ін. Переважно використовують паливо після попередньої підготовки до спалювання: сортування, брикетування, гранулювання, пакування тощо. Найбільш розповсюджені на ринку водогрійні котли для

спалювання гранул з деревних чи рослинних відходів, що характеризуються малою зольністю й вологістю. Разом з тим, за високої вартості такого палива його використання не завжди є доцільним, особливо за наявності дешевого нижчої якості місцевого палива. Хоча його спалювання із забезпеченням відповідного рівня нормативних вимог потребує застосування удосконалених конструктивних схем. Ураховуючи дефіцит паливних ресурсів власного видобутку та високу ціну спеціально підготовленого палива, доцільним є використання різних видів палива, серед яких місцевого низькосортного. Світові тенденції розвитку опалювальної техніки вказують на подальше зростання частки котлів малої потужності на традиційному твердому паливі та органічних відходах.

**Актуальність дослідження.** Забезпечення ефективного використання різних видів твердого палива в широкому діапазоні їхніх характеристик, серед яких дешевого різнофракційного палива в малометражних опалювальних твердопаливних котлах нескладної конструкції дозволяє знизити собівартість теплової енергії.

**Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень** за напрямком роботи та відомостей



виробників теплогенераційного обладнання [1–17 та ін.] показав, що в системах теплопостачання приміщень, будівель і споруд застосовують твердопаливні опалювальні котли потужністю до 100 кВт з різноманітними типами топкових пристроїв: від простих топків з ручним обслуговуванням, напівмеханічних і механічних топків до автоматизованих пристроїв складної конструкції.

Різнманітність конструкцій топкових пристроїв пояснюється широким діапазоном спалюваного твердого палива, значною відмінністю в складі робочої маси (вмісту баласту – золи та вологи, – легких речовин), у фракційному складі, теплоті згоряння, спікливості золи тощо. На інтенсивність процесу спалювання твердого палива в шарі впливають багато факторів:

- структура шару;
- розмір частинок палива;
- форсування дуттьового повітря;
- температурні умови камери згоряння;
- вологість і зольність палива;
- властивості золи;
- вихід легких речовин.

Суттєва відмінність твердого палива за теплотехнічними характеристиками вимагає для його ефективного використання відповідних технологічних схем спалювання, реалізованих у різноманітних конструкціях топків. Вибір схеми організації процесу горіння твердого палива, реалізованої в топкових пристроях котлів, обумовлюється в першу чергу співвідношенням вмісту вологи і золи в паливі, а також прийнятним рівнем обслуговування в умовах експлуатації.

Нижче наведено розповсюджені схеми спалювання твердого палива, які реалізовані в промислових зразках твердопаливних котлів потужністю до 100 кВт. Найбільш поширене в таких котлах спалювання твердого палива в сталому шарі.

Найпростішим топковим пристроєм, який і зараз використовується в окремих установках малої потужності, є топка з ручною періодичною подачею палива на колосникову решітку. Котли з такими топками характеризуються простотою обслуговування та відносно невеликою вартістю.

Особливістю теплової роботи топків з ручним обслуговуванням є циклічність топкового процесу, тобто нерівномірність показників роботи з періодичною зміною переважних стадій горіння палива.

Також, важливим фактором, який впливає на ефективність спалювання, є відповідність

живого перерізу колосникової решітки характеристикам спалюваного палива. Так, живий переріз решіток становить:

- для спалювання полін деревини та кускового торфу в межах 25...40 %;
- для антрациту і кам'яного вугілля – в межах 12...18 %.

Недоліками ручних топків є те, що при завантаженні свіжої порції палива раптовий вихід легких речовин може призводити до значного зростання хімічної неповноти згоряння. Також їхня експлуатація пов'язана з важкою ручною працею. Покращення теплової роботи таких котлів досягають шляхом спалювання низькорекційного палива та збільшення тривалості між фазовими змінами горіння в топках шахтового типу (рис. 1).

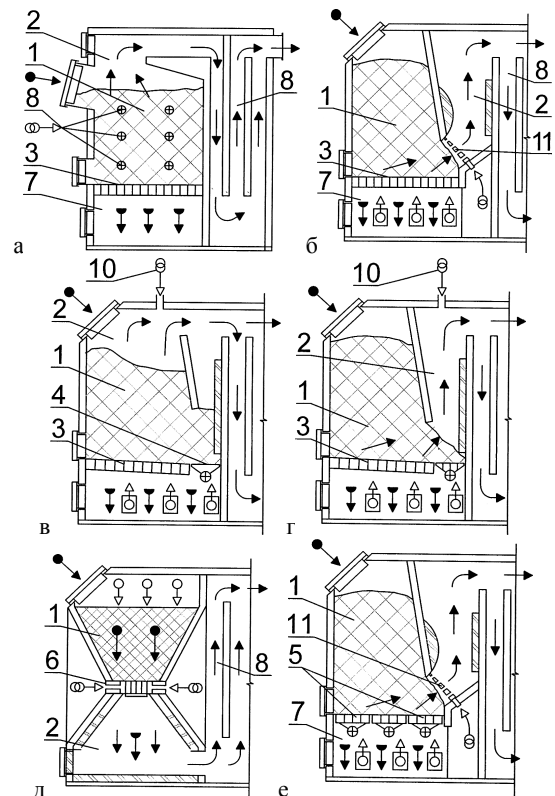


Рис. 1. Схеми твердопаливних котлів з шахтовими топками:

- а, б – з нерухомою колосниковою решіткою;
- в, г – з перекидним колосником у зоні вигорання шару;
- д – з колосниковою решіткою з соплами вторинного повітря;
- е – з колосниковою решіткою з поворотними колосниками:

- 1 – шахта паливна; 2 – камера згоряння;
- 3 – нерухома колосникова решітка; 4 – перекидний колосник; 5 – колосникова решітка з поворотними колосниками; 6 – колосникова решітка із соплами вторинного дуття; 7 – зольник; 8 – газохід конвективний;
- 9 – сопла подачі повітря, первинного і вторинного;
- 10 – сопла вторинного повітря; 11 – система розподілення вторинного повітря;

умовні позначення на цьому рисунку і далі за текстом:

- – подача палива; ○→ – первинне повітря;
- ⊙→ – вторинне повітря; → – продукти горіння;
- ▶→ – видалення золи

Шахові топки мають розвинуту за висотою завантажувальну горловину (шахту), у якій відбувається підсушування, розігрівання і часткове виділення летких речовин. По мірі згоряння палива вище розташовані підготовлені шари переміщуються в активну зону горіння на колосниковій решітці.

Горіння палива в шахті може бути як верхнім, так і нижнім. Подача первинного повітря виконується за протитечійною або прямотечійною схемами. Подача вторинного повітря відбувається до зони горіння газів на виході з шару. У таких топках спалюють малозольне паливо з невисокою вологістю, сортове або гранульоване.

Для підтримання стабільності роботи котла необхідне періодичне чищення колосникової решітки від золи й шлаку. Зменшення трудомістких ручних операцій чищення досягають у напівмеханічних топках з поворотними або коливальними колосниками. Зниження експлуатаційних витрат досягається при застосуванні пелетних пальників з механічною подачею пелетів до зони горіння.

Механізація подачі палива й очищення шару від шлаку дозволяє значно зменшити фізичну працю та підвищити економічність топкового пристрою. При цьому забезпечуються умови для вирівнювання показників топкового процесу протягом тривалої експлуатації (рис. 2).

Водночас, застосування механічних топко значно підвищує вартість конструкції котлів. На промисловому ринку виробники пропонують різноманітні конструкції механізованих котлів [13-17] малої потужності до 100 кВт як з

експлуатацією за присутності оператора, так і за його тривалої відсутності – в автоматичному режимі (рис. 3).

У твердопаливних котлах з автоматичним режимом роботи крім механізації подачі палива, чищення від золи та її видалення за межі котла, забезпечується механізоване чищення конвективних теплообмінних поверхонь та автоматичне регулювання розподілення первинного і вторинного повітря при зміні теплового навантаження. Для досягнення стабільності роботи котла в автоматичному режимі використовують високоякісне гранульоване паливо з малою зольністю й вологістю.

У підсумку можна констатувати, що ефективність спалювання твердого палива обумовлюється ступенем механізації технологічних процесів та якістю палива. Висока якість процесу спалювання палива досягається в автоматизованих котлах на попередньо підготовленому однорідному сортовому паливі. У таких котлах забезпечується автоматизоване керування операціями обслуговування та безпеки роботи за відсутності оператора. Здебільшого передбачається і механізоване очищення теплообмінних поверхонь, зокрема конвективних, від золошлакового забруднення. Водночас, така технологія вимагає значні капітальні затрати на складні конструкції котлів і експлуатаційні витрати на обслуговування та дороге якісне паливо.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є аналіз запропонованої конструктивної схеми опалювального водогрійного котла малої потужності з напівмеханічною топкою з нормативною ефективністю роботи за низької вартості обладнання.

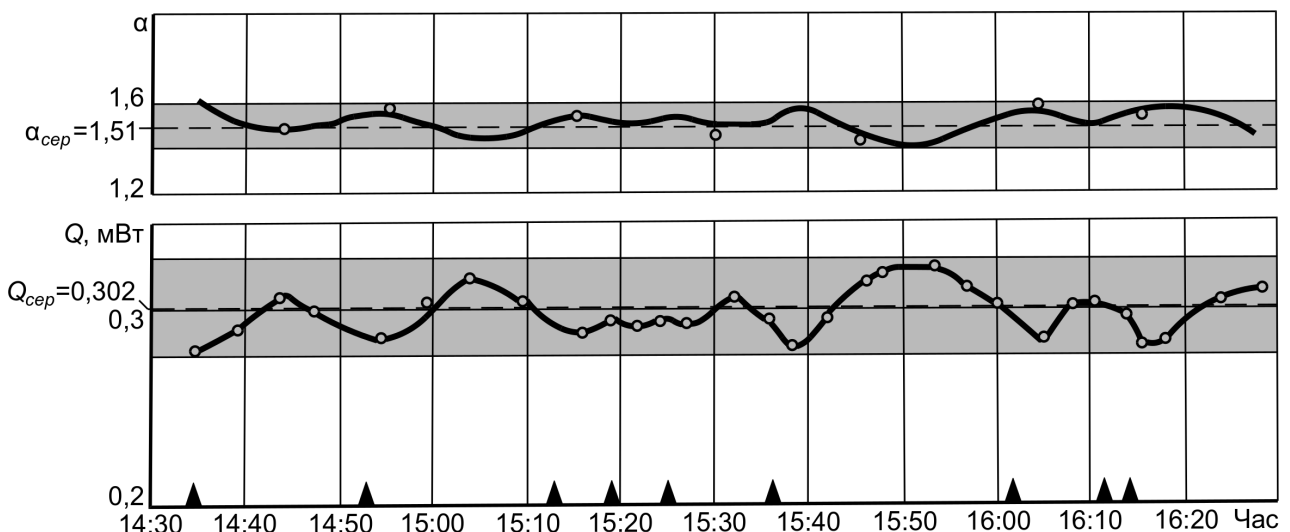


Рис. 2. Зміна в часі доби (год:хв) коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  та потужності  $Q$ , мВт, котла з механічною шахтошаровою топкою:

сірим кольором виділено діапазон зміни параметрів, максимальне відхилення від середніх значень  $\alpha_{сер}$  і  $Q_{сер}$ , мВт, становить 6,8 %

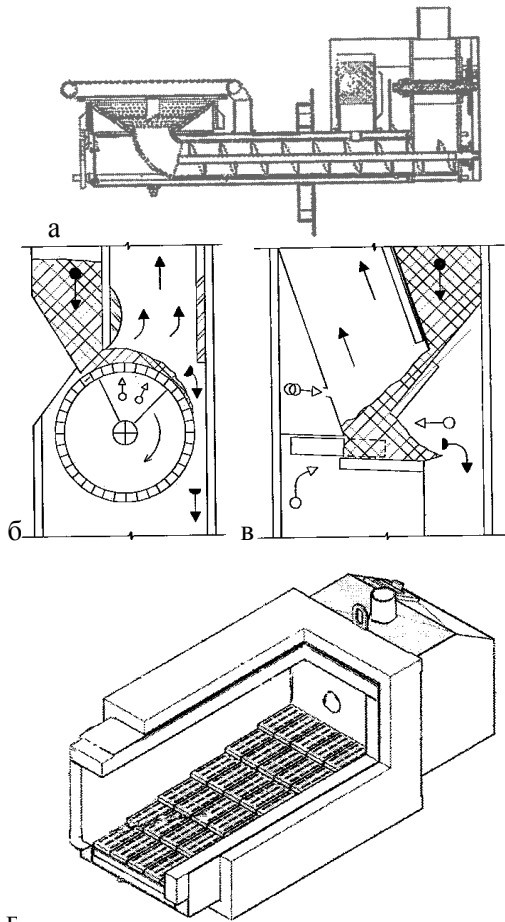


Рис.3. Схеми механічних топок:  
 а – ретортна; б – з барабанною колосниковою решіткою; в – із плунжерним штовхачем;  
 г – з перештовхувальними колосниками

**Виклад основного матеріалу.** Зниження капітальних затрат на котельне обладнання можливе при зменшенні ступеня механізації технології спалювання місцевого палива. Але при цьому слід забезпечити нормативні показники роботи котла як з екологічної, так і з економічної точки зору.

У роботі пропонується конструктивна схема опалювального водогрійного котла малої потужності з комбінованою технологічною схемою спалювання в шахті із затискною решіткою та в шарі на обертовій колосниковій решітці (рис. 4). Конструкція котла передбачає:

- водоохолоджуваний корпус циліндричної форми в топковій і конвективній частинах (поз. 1);
- напівмеханічну топку (поз. 2);
- перехідний опускний канал газоходу (поз. 30);
- конвективний газохід (поз. 5), що складається з димогарних труб (поз. 31) зі стрічковими турбулізаторами (поз. 32).

Гідравлічний тракт котла приєднується до

системи опалення через патрубки (поз. 6 і 7) на вході і виході гідравлічного трату, а патрубків відхідних газів (поз. 8) – до димової труби (або димососа). Декоративний кожух (поз. 9) котла з теплоізоляцією забезпечує зниження тепловтрат поверхні в навколишнє середовище.

Топка містить:

- обертову колосникову решітку (поз. 3);
- затискну решітку;
- паливну шахту (поз. 10);
- камеру згоряння (поз. 11);
- зольник (поз. 4);
- люки з дверцятами для обслуговування.

Колосникова решітка складається з корпусу круглої форми, у якому розміщені чавунні колошники з прорізами відповідних розмірів залежно від характеристик спалюваного палива і необхідною площею живого перерізу для подачі первинного повітря. Корпус решітки розміщується на коткових опорах і обладнаний приводом (поз. 16) для його обертання (на рисунку показано ручний привід). Одна частина колосникової решітки служить дном паливної шахти, а інша є допалювальною решіткою камери згоряння. Затискна решітка утворена такими конструктивними елементами:

- нижня водоохолоджувана балка (поз. 12);
- колектор вторинного дуття (поз. 13) із жаростійкої сталі;
- чавунні перегородки (поз. 14).

Останні встановлені уступом між собою вглиб шахти для забезпечення надійного опускання палива до зони горіння та з горизонтальними зазорами для виходу продуктів газифікації із шахти до топкової камери. Паливна шахта обмежена боковою та верхньою стінками корпусу, колосниковою решіткою й елементами затискної решітки.

Для обслуговування котла корпус конвективного пакета обладнано:

- люками із теплоізолюваними кришками – верхньою (поз. 17) і нижньою (поз. 28);
- клапаном розпалювальним (поз. 18);
- лючком (поз. 29) для чищення газоходу.

Корпус топки має чотири люки з відповідними конструктивними елементами для забезпечення щільності для газів та для обслуговування процесу спалювання палива в топці:

- верхній з кришкою (поз. 19) та дверцятами (поз. 20);
- боковий верхній двосекційний з бункером (поз. 21), затвором (поз. 22) та дверцятами (поз. 23) – для подачі палива до шахти та експлуатаційного обслуговування камери згоряння;

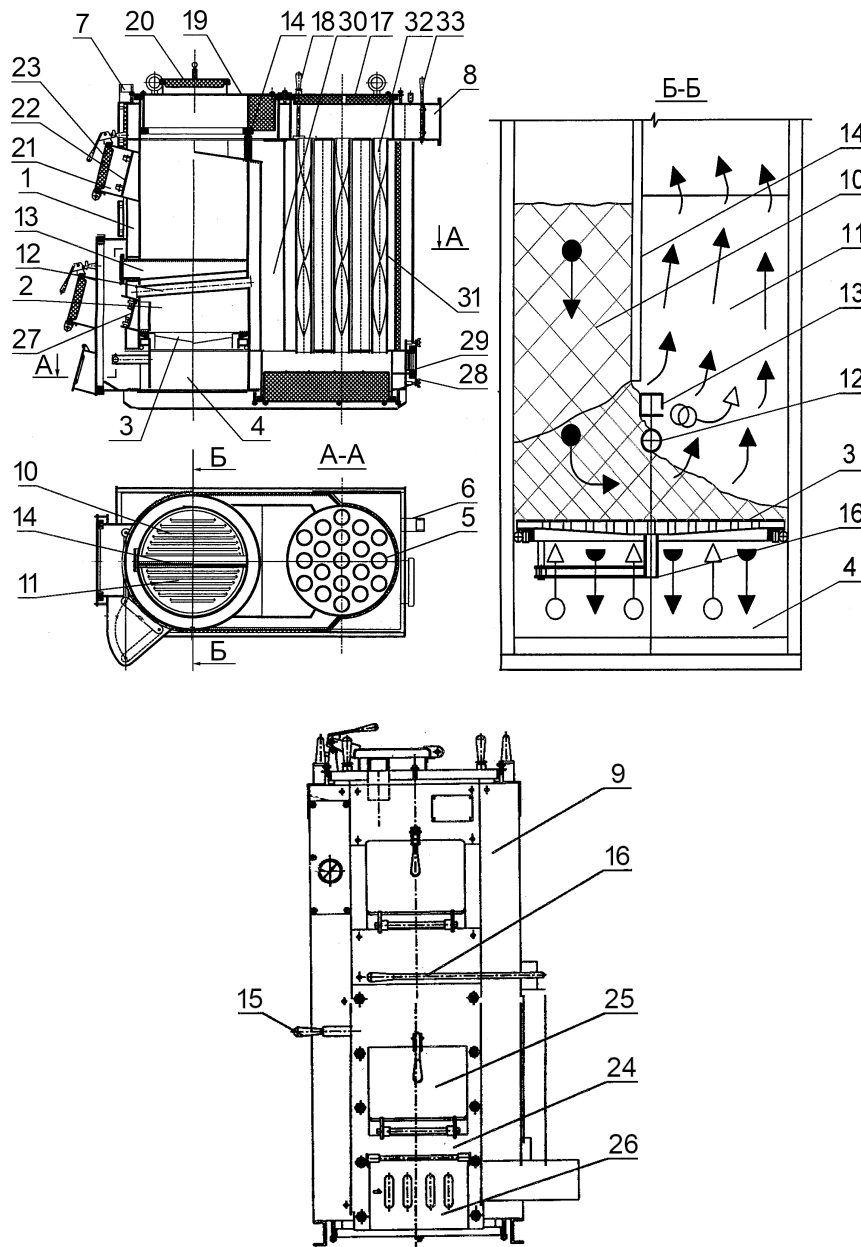


Рис. 4. Твердопаливний котел з напівмеханічною топкою:  
а – розрізи, б – загальний вигляд:

- 1 – корпус; 2 – топка напівмеханічна; 3 – обертова колосникова решітка; 4 – зольник; 5 – газохід конвективний; 6, 7 – патрубки для приєднання до системи опалення; 8 – патрубок відхідних газів; 9 – кожух декоративний; 10 – шахта паливна; 11 – камера згоряння; 12 – балка водоохолоджувана; 13 – колектор вторинного дуття; 14 – перегородки чавунні; 15 – шибер вторинного повітря; 16 – привід ручний; 17 – кришка верхня газоходу; 18 – клапан розпалювальний; 19 – кришка верхня топки; 20 – дверцята кришки; 21 – бункер; 22 – затвор; 23 – дверцята бункера; 24 – блок дверей; 25 – дверцята топкові; 26 – дверцята зольника; 27 – щиток; 28 – кришка нижня газоходу; 29 – лючок газоходу; 30 – канал опускний газоходу; 31 – труби димогарні; 32 – турбулізатор стрічковий; 33 – шибер

- два бокові нижні – в зоні полотна колосникової решітки (поз. 25) та в зольнику (поз. 26).

Котел може працювати або на природній тязі димової труби або з димососом. Розглянемо принцип роботи котла. За наявності на колосниковій решітці (поз. 3) в нижній зоні шахти (поз. 10) та топковій камері (поз. 11) достатньої кількості розжареного коксу при відкритому клапані (поз. 18) заповнюють паливом шахту

через паливну секцію бункера (поз. 21) при закритому затворі (поз. 22) в топковій секції бункера. По мірі виходу на стабільний режим горіння палива в нижній зоні шахти і топковій камері закривають розпалювальний клапан і регулюють подачу первинного повітря. Первинне повітря подають під колосникову решітку із зольника крізь отвори в дверцятах (поз. 26) з регулюванням його кількості при повороті полотна дверцят та зміні розрідження

в топковій камері поворотом шибера (поз. 18). Для зниження шкідливих викидів у відхідних газах при спалюванні реакційного палива в зону горіння продуктів газифікації на виході із затискової решітки подають повітря через колектор вторинного дугтя (поз. 13), кількість якого регулюють шибером (поз. 15). Чергову порцію палива на допалювальну решітку (частина колосникової решітки, що знаходиться в камері згорання) подають крізь нижнє вікно в шахті між полотном колосникової решітки (поз. 3) і балкою (поз. 12) при повороті решітки за допомогою приводу (поз. 16). За конструкції ручного приводу один поворотний хід колосникової решітки виконують поворотом важеля і його поверненням у вихідне положення. Під час виходу частини колосників з шахти і повернення у вихідне положення відбуваються:

- винесення шару коксу, що горить, до топкової камери;
- інтенсивне взаємне переміщення частинок палива, що сприяє шуруванню шару.

При спалюванні високозольного рядового палива є необхідність додаткового ручного шурування шару, що горить. По мірі накопичення на допалювальній решітці шлаку і золи потрібне періодичне її чищення. На відміну від топок з ручним обслуговуванням, в топці з обертовою колосниковою решіткою під час подачі палива в камеру згорання не відбувається значного збурення процесу горіння на допалювальній решітці. Процес спалювання протікає з прийнятною рівномірністю завдяки:

- плавному винесенню з нижньої зони шахти в топкову камеру порції розпеченого і нерухомого на колосниках шару напівкоксу;
- шуруванню в зоні накопичення золи і шлаку при поверненні колосників у вихідне положення.

Конструкція котла водогрійного потужністю 50 кВт з напівмеханічною топкою розроблена спеціалістами Державного науково-дослідного інституту санітарної техніки обладнання будівель і споруд (м. Київ) за участю автора. Експериментальні випробування шахтно-шарової топки з обертовою решіткою в складі електровугільного котла потужністю 50 кВт для залізничних вагонів були проведені на стенді науково-дослідного інституту. Вони підтвердили стабільну роботу з нормативними показниками на сортовому і рядовому антрациті та рядовому кам'яному вугіллі. Під час випробувань використовувався ручний привід обертання колосникової решітки. Конструкція топки дозволяє застосування механічного приводу переміщення решітки з автоматичним

керуванням режиму подачі палива і шурування шару. Таку конструкцію можна віднести до класу котлів з напівмеханічними топками. За нескладної конструкції це дає можливість використовувати дешеве паливо з малими затратами на підготовку до спалювання.

Конструктивні габарити зони горіння топкового пристрою прийнято з урахуванням вимог до конструкцій топок і котлів, нормативних вимог щодо теплонапруження дзеркала горіння й топкового об'єму [10,11] та інших розрахункових величин. Розрахункові конструктивні і режимні параметри зони горіння на обертовій колосникової решітці в топковій камері при спалюванні вугілля або антрациту можна визначити за методикою, наведеною в [5, 9], яка базується на даних щодо швидкості горіння коксу.

Розрахунковий радіус колосникової обертової решітки можна визначити за формулою

$$R = \frac{\delta_n^{2,5}}{2,5 \pi A} = \sqrt{\frac{\delta_n^{1,5} B_p}{2,5 \pi \cdot 0,185 C_0 D^{0,5} W^{0,5} h_n m}}, \quad \text{м}, \quad (1)$$

де  $\delta_n$  – початковий розмір частинок на виході із шахти, м;  $B_p$  – розрахункова витрата палива на вході решітки, кг/год;  $A$  – постійна величина,  $\text{м}^{1,5}$ ;  $C_0$  – молярна концентрація кисню в шарі, моль/м<sup>3</sup>;  $D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $W$  – приведена швидкість дугтьового повітря, м/с;  $h_n$  – початкова висота шару (вікна шахти) на вході решітки, м;  $m$  – пористість шару (прийнято в розрахунках  $m = 0,5$ );  $0,185$  – розмірний коефіцієнт, кг·с/(моль·год);  $W$  – приведена швидкість дугтьового повітря, яка віднесена до площі живого перерізу шару, м<sup>2</sup>, і середньої температури в шарі  $T_{ш}$ , К, а саме

$$W = \frac{W_o T_{ш}}{m T_o}, \quad \text{м/с}; \quad (2)$$

$W_o$  – швидкість, м/с, при стандартній температурі  $T_o = 273,15$  К.

Час горіння часток у шарі на обертовій решітці

$$t = \frac{5}{3} \pi^{\frac{3}{5}} \frac{\delta_n}{\omega_n} \cdot \left( \frac{5}{2} A R \right)^{-\frac{2}{5}}, \quad \text{год}, \quad (3)$$

де  $\omega_n$  – початкова кутова швидкість переміщення

ня частинок.

$$\omega_n = \frac{2 B_p}{R^2 h_n m \rho}, \text{ год}^{-1}, \quad (4)$$

де  $\rho$  – густина частинок,  $\text{кг/м}^3$ .

**Висновки.** Зростання частки промислового впровадження твердопаливних котлів малої потужності є доцільним як альтернатива теплогенераційним установкам на дорогих

енергоносіях – природному газі та рідкому паливі. Застосування напівмеханічних топків з обертовою решіткою в конструкціях мало-метражних опалювальних твердопаливних котлів створює умови для розширення діапазону спалюваного палива, серед якого дешевого різнофракційного. Простота запропонованої конструкції, малозатратна підготовка палива та зменшення витрат праці на ручне обслуговування дозволяє знизити вартість конструкції та експлуатаційні витрати.

### Література

1. Степанов Д. В. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця: КІВЦ ВНТУ, 2011. – 151 с.
2. Братенков В. Н. Теплоснабжение малых населенных пунктов / В. Н. Братенков, П. А. Хаванов, Л. Я. Вэскер. – Москва: Стройиздат, 1988. – 223 с.
3. Никель Е. Повышение использования первичных энергетических ресурсов и уменьшение пылевыведения в автоматических установках со слоевыми топками на твердом топливе / Е. Никель, Г. Хельфельд. – Киев, 1985. – 181 с.
4. Варес В. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Каськ, П. Муйсте, Т. Пиху, С. Соосаар. – Таллин. 2005. – 183 с.
5. Senchuk M. P. Simulation of Solid-Fuel Hybrid Combustion / M. P. Senchuk, A. V. Barkovskiy // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*: наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 21. – с. 11-17.
6. Пат. 50214 А Україна F24В1/02. Котел для спалювання дров, кускового торфу та відходів деревини / А. С. Макаров, М. П. Сенчук, Г. М. Невструева: власник Державний науково-дослідний інститут санітарної техніки і обладнання будівель та споруд; заявл. 23.11.2001; опублік. 15.10.2002, Бюл. №10.
7. Роддатис К. Ф. Котельные установки: учеб. пособие / К. Ф. Роддатис. – Москва: Энергия, 1977. – 432 с.
8. Кузьмин С. Н. Биоэнергетика: учебн. пособ. / С. Н. Кузьмин, В. Н. Ляшков, Ю. С. Кузьмина. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 80 с.
9. Сенчук М. П. Швидкість горіння твердого палива в топкових процесах опалювальних котлів / М. П. Сенчук // Вісник національного університету «Львівська політехніка», серія: теорія і практика будівництва. – 2016. – №844. – С.194–202.
10. ДСТУ 2326-93. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Загальні технічні умови. – Чинний від 1995-01-01. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 17 с.
11. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт. – Введен с 2003-01-01. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 30 с.
12. Пелетна топка «Факел» (ПМЗ «ДЕНАС»МАШ, Україна). Режим доступу: <http://denasmash.com/ukr/tverdotoplivnyye-kotly/avtomaticheskije-pelletnyye-gorelki-fakel/>
13. Твердопаливні котли (HERZ Energietechnik, Австрія). Режим доступу: <https://bio.ukr.bio/ua/boilers/brand/13-HERZ/>
14. Твердопаливні котли «HEIZOMAT RHK» (Німеччина). Режим доступу: <http://www.saelen-energie.fr/chauffage-biomasse-miscanthus-Heizomat.html>
15. Твердопаливні котли «Світлобор Авто» (Україна). Режим доступу: <https://www.enemcon.com/pelletnyye-kotly/s-samoochistkoj/svetlobor-avto-90>
16. Твердопаливні котли (ТОВ «Газотрон-Влатава», Україна). Режим доступу: <https://www.gazotron.com>
17. Твердопаливні котли (ТОВ Котлозавод «Кригер», Україна). Режим доступу: <https://1552.com.ua/ua/catalog/kotlozavod-kriger-ooo-7323/>

### References

1. Stepanov D. V., Bodnar L. A. *Enerhetychna ta ekolohichna efektyvnist vodohriinykh kotliv maloi potuzhnosti*, KIVIZ VNTU, 2011.
2. Bratenkov V., Khavanov P., Vesker L. *Teplosnabzhenie malykh naseleennykh punktov*. Stroizdat, 1988.
3. Nickel E., Hofeld G. *Povyshenie ispolzovaniya pervichnykh energetycheskikh resursov i umenshenie pylivyedeleniia v avtomaticheskikh ustanovkakh so sloevymi topkami na tverdom toplive*. Kiev, 1985.
4. Vares V., Kask, Muiste P., Pikhu T., Soosaar S. *Spravochnik potrebitelia biotopliva*. Talliin. 2005
5. Senchuk M. P., Barkovskiy A. V. “Simulation of Solid-Fuel Hybrid Combustion”. *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplozopostachannia*, 2017. Vyp. 21. P. 11-17.

6. Makarov A. S., Senchuk M. P., Nevstrueva H. M. "Kotel dlia spalivannia drov, kuskovoho torfu ta vidkhodiv derevyny." Patent of Ukraine 50214 A. 15.10.2002.
7. Roddatis K. *Kotelnye ustanovki*. Energy, 1977.
8. Kuzmin S. N., Liashkov V. N., Kuzmina Yu. S. *Byoenergetika*. FHBOU VPO "THTU", 2011.
9. Senchuk M. P. "Shvydkist horinnia tverdoho palyva v topkovykh protsesakh opaliuvalnykh kotliv". *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika», seriia: teoriia i praktyka budivnytstva* 2016. №844. P. 194-202.
10. *Kotly opaluvalni vodohriini teploproduktivnisti do 100 kVt. Zahalni tehnicni umovy*. DSTU 2326-93, Derzhstandart Ukrainy, 1994.
11. *Kotly otopitelnye vodogreinye teploproizvoditelnosti ot 0,1 do 4 MVt*, HOST 30735-2001, Mezhsosudarstvennyi soviet po standartizatsii, metroloyii i sertifikatsii, 2001.
12. Peletna topka «Fakel» (PMZ «DENAS»MASH, Ukraina). Rezhym dostupu: <http://denasmash.com/ukr/tverdoplivnyye-kotly/avtomaticheskie-pelletnye-gorelki-fakel/>
13. Tverdopalyvni kotly (HERZ Energietechnik, Avstriia). Rezhym dostupu: <https://bio.ukr.bio.ua/boilers/brand/13-HERZ/>
14. Tverdopalyvni kotly «HEIZOMAT RHK» (Nimechchyna). Rezhym dostupu: <http://www.saelen-energie.fr/chauffage-biomasse-miscanthus-Heizomat.html>
15. Tverdopalyvni kotly «Svitlobor Avto» (Ukraina). Rezhym dostupu: <https://www.enemcon.com/pelletnye-kotly/s-samoochistkoj/svetlobor-avto-90>
16. Tverdopalyvni kotly (TOV «Hazotron-Vlatava», Ukraina). Rezhym dostupu: <https://www.gazotron.com>
17. Tverdopalyvni kotly (OOO Kotlozavod «Kryher», Ukraina). Rezhym dostupu: <https://1552.com.ua/ua/catalog/kotlozavod-kriger-ooo-7323/>

УДК 697.432

## Комбинированная схема сжигания твёрдого топлива в отопительных котлах малой мощности

М. П. Сенчук<sup>1</sup>

к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [smp21@ukr.net](mailto:smp21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

***Аннотация.** Рассмотрены различные конструктивные схемы сжигания твёрдого топлива в отопительных водогрейных котлах до 100 кВт с анализом их эффективности. С целью снижения капитальных и эксплуатационных затрат целесообразно промышленное внедрение сравнительно недорогих образцов отопительных котлов малой теплопроизводительности с приемлемым уровнем механизации технологии сжигания деиёвого, в том числе местного топлива, с минимальными затратами на его подготовку. Предложена конструкция отопительного водогрейного котла с полумеханической топкой, технологическая схема сжигания которой сочетает процессы сушки, газификации и горения топлива в шахте с зажимной решёткой и выгорания кокса в слое на подвижной колосниковой решётке. Отмечено, что при периодической подаче топлива в топку с оборотной колосниковой решёткой поддерживается стабильность процесса горения в камере сжигания, в период между чистками от золы и шлака, без значительного изменения состава надслоевых газов. Благодаря плавному перемещению на подвижной колосниковой решётке порции раскалённого кокса из топливной шахты в топочную камеру создаются условия для поддержания равномерности работы котла с нормативными показателями. Снижение вредных выбросов в уходящих газах при сжигании реакционного топлива достигается подачей через коллектор вторичного дутья воздуха в зону горения летучих веществ на выходе из зажимной решётки. Приведены аналитические уравнения определения размеров зоны горения по режимным и конструктивным параметрам процесса сжигания. Эффективность применения в мало-мощных котлах комбинированной (шахтно-слоевой) технологической схемы проверена во время испытаний сжигания угля разного качества в полумеханической топке с оборотной колосниковой решёткой в составе электроугольного котла теплопроизводительностью 50 кВт для железнодорожных вагонов.*

***Ключевые слова:** комбинированная схема сжигания, шахтно-слоевая схема, отопительный водогрейный котёл, твердотопливный котёл, полумеханическая топка, оборотная колосниковая решётка, твёрдое топливо*

UDC 697.432

## Combined scheme of solid fuel combustion in low power boilers

M. P. Senchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

**Abstract.** *Different constructive schemes of solid fuel combustion in heating boilers up to 100 kW with the analysis of their efficiency depending on the quality of the burned solid fuel are considered. It is established that low-power solid fuel boilers with various types of combustion devices depending on the characteristics of the burned fuel and the accepted level of service are used in heat supply systems of premises, buildings and structures: from simple furnaces with manual maintenance to automated combustion devices of complex design. Mostly pre-prepared high-quality fuel is used for combustion: fuel pellets, briquettes, high-quality coal, the high cost of which significantly increases operating costs. In order to reduce capital and operating costs, it is advisable to introduce relatively inexpensive models of low-power heating boilers with an acceptable level of mechanization of combustion technology of cheap fuel, including local, with minimal costs for its preparation. The design of a heating water boiler with a semi-mechanical furnace and a technological scheme of combustion is proposed, which combines the processes of drying, gasification and combustion of fuel in a shaft with a clamping grate and combustion of coke in a layer on a moving grate. It is noted that the periodic supply of fuel in the furnace with a moving grate is maintained the stability of the combustion process in the combustion chamber, in the period between cleaning of ash and slag, without significant changes in the composition of above-layer gases. Due to the smooth movement of the next portion of hot coke from the fuel shaft to the combustion chamber on the rotating grate, conditions are created to maintain the uniformity of the boiler with the normative indicators. A reduction in harmful emissions in the exhaust gases was achieved during the combustion of the reaction fuel by passing a secondary blast of air through a collector and directing it to the combustion zone of light substances at the outlet of the clamping grate. Analytical equations for determining the size of the combustion zone according to the regime and design parameters of the combustion process are given. The efficiency of application of the combined (shaft-layer) technological scheme in low-power boilers was tested during testing of combustion of different quality coal in a semi-mechanical furnace with a rotating grate in the electric coal boiler with a heat output of 50 kW for railway carriages.*

**Keywords:** *combined combustion scheme, shaft-layer scheme, heating hot water boiler, solid fuel boiler, semi-mechanical furnace, circulating grate, solid fuel*

*Надійшла до редакції / Received 20.11.2020*



УДК 697.1

## Теплофізичне моделювання та дослідження теплотехнічних характеристик водяної теплої підлоги сухого способу укладання

Б. І. Басок<sup>1</sup>, М. П. Новіцька<sup>2</sup>, С. М. Гончарук<sup>3</sup>

<sup>1</sup> д.т.н., проф. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, [basok@itf.kiev.ua](mailto:basok@itf.kiev.ua),  
ORCID:0000-0002-8935-4248

<sup>2</sup> к.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, [mmarina@ukr.net](mailto:mmarina@ukr.net),  
ORCID: 0000-0003-2867-101X

<sup>3</sup> к.т.н., провідний науковий співробітник. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна,  
[goncharuk-s@ukr.net](mailto:goncharuk-s@ukr.net), ORCID: 0000-0002-5609-7337

***Анотація.** Використання систем підлогового опалення є ефективним способом досягнення теплового комфорту користувачів у енергоефективних будівлях. У роботі наведено теоретичні дослідження теплотехнічних параметрів системи теплої водяної підлоги сухого способу укладання. Система сухого монтажу, яка розглянута в роботі, складається із утеплювача (пінополістирол), на якому розташовано труби системи опалення, що контактують із алюмінієвою теплорозподільною пластиною. Цю систему покрито згори фінішним покриттям. Розрахунок проводився на основі системи рівнянь імпульсу й енергії та виконаний для стаціонарного режиму експлуатації системи підлогового опалення. Валідація моделі проведена із використанням результатів експериментальних досліджень. У роботі зроблено висновки, що дану конфігурацію системи підлогового опалення, можливо використовувати в системах опалення житлових і нежитлових приміщень. Алюмінієва теплорозподільна пластина суттєво впливає на теплообмінні процеси в системі. Завдяки ній відбувається вирівнювання теплового потоку в площині поверхні підлоги, що позитивно впливає на тепловий розподіл та зменшує термічні напруження у фінішному покритті. Використання керамічної плитки збільшує загальну ефективність теплообміну системи з повітрям приміщення. Збільшення товщини плити пінополістиролу збільшує значення густини теплового потоку з поверхні теплої підлоги. До збільшення густини теплового потоку із поверхні підлоги також приводить збільшення витрати та температури теплоносія.*

***Ключові слова:** тепла підлога, алюмінієва теплорозподільна пластина, чисельне моделювання, сухий спосіб монтажу*

**Вступ.** Використання систем підлогового опалення є ефективним способом досягнення теплового комфорту користувачів у енергоефективних будівлях. Використання таких систем широко розповсюджується в Україні та світі. У теперішній час існує два типи таких систем:

- традиційна система підлогового опалення;
- система підлогового опалення сухого монтажу.

У традиційних системах, труби розташовано в прошарку цементно-піщаної стяжки. Стяжка лежить на утеплювачі та покривається фінішним покриттям.

У системах сухого монтажу цементно-піщана стяжка не використовується. Труби із теплоносієм розміщують на утеплювачі. Вони контактують із алюмінієвою теплорозподільною пластиною. Ця система покривається фінішним покриттям.

**Актуальність дослідження.** Підвищення енергоефективності будівель, зокрема, з використанням радіаційного підлогового опалення, є актуальною задачею, пов'язаною зі збереженням вичерпних енергетичних ресурсів та енергетичною безпекою держави.

**Останні дослідження та публікації.** У теперішній час у науковій літературі можна знайти достатню кількість досліджень систем підлогового опалення. Так, традиційним системам присвячено роботи [1-6]. Наприклад, в [1] розглянуто двовимірну нестационарну модель для системи водяного підлогового опалення. Основну увагу в роботі приділено визначенню теплових потоків, що втрачаються крізь фундамент. Показано, що вони істотно впливають на енергоспоживання енергоефективного будинку. Але в моделі не враховується вологість ґрунту, що приводить до недооцінювання теплових потоків.

Моделювання тепловіддачі від системи підлогового опалення до простору кімнати розглядається в роботах [2, 3]. У [2] представлено результати чисельного моделювання теплообміну між теплоносієм та повітрям у приміщенні з підлоговим опаленням. Результати моделювання зіставлено з експериментом. Методом чисельного моделювання отримано графіки навантаження підлогового опалення для різних кроків укладання труби.

У [3] проведено параметричний аналіз, системи підлогового опалення кімнати з розмі-

рами 3×4 м методом чисельного моделювання. Метою є визначення впливу індивідуальних параметрів на систему підлогового опалення. Дослідження, наведені в роботі, показали, що діаметр і матеріал труби не істотно впливає на ефективність системи підлогового опалення. Найбільш впливовими параметрами є товщина та тип підлогового покриття.

У [4] наведено аналітичне рішення для спрощеної схеми системи підлогового опалення. Доведено, що використані в роботі спрощення істотно не впливають на результати розрахунків. Наведені результати задовільно узгоджуються з чисельним розв'язком та експериментальними даними.

У роботі [5] запропоновано дві моделі для покращення точності розрахунків теплових процесів у стяжці традиційної водяної теплої підлоги. Проте ці моделі неможливо застосувати при розрахунках інших типів систем підлогового опалення.

Метод розрахунку температури поверхні системи підлогового опалення запропоновано в [6]. Систему підлогового опалення в моделі представлено у вигляді двох шарів. У роботі показано, що результати розрахунку температури поверхні добре узгоджуються з чисельним моделюванням та експериментальними даними.

Досліджень, що стосуються систем підлогового опалення сухого монтажу значно менше [7-11]. У роботі [7] за допомогою чисельного моделювання та експерименту досліджено систему підлогового опалення без бетонної стяжки. Ця система складається з шару утеплювача, покритого алюмінієвою фольгою. На ньому в повітряному прошарку лежать труби системи водяного підлогового опалення. Згори від них розташовано шар підлогового покриття.

У зазначеній роботі [7] досліджено вплив таких параметрів, як температура води, що подається в систему, та відстань між трубами системи опалення. Дослідження виконано на моделі, валідація якої проведена за допомогою експериментального стенда. Крім того, у роботі проаналізовано тепловий комфорт у приміщенні. Показано, що система працює стабільно. Тепловий комфорт у приміщенні, яке обладнано такою системою, відповідає необхідним критеріям.

У роботі [8] досліджено систему сухого способу монтажу, у якій теплоізоляційною пластиною є поліетиленові мати, покриті тонким шаром алюмінію. Над нею розміщено

шар сухої стяжки та фінішне покриття. Наведено порівняння цієї системи із системою, що має алюмінієву теплоізоляційну пластину. Показано, що при використанні поліетиленових матів із металізованою плівкою тепловий потік з поверхні системи з матами на 43...66 % менший ніж при використанні алюмінієвої теплоізоляційної пластилини, хоча металізовані мати дешевші.

**Формулювання цілей статті.** Метою цієї роботи є проведення теоретичних досліджень теплотехнічних параметрів системи водяної теплої підлоги сухого способу укладання з алюмінієвою теплоізоляційною пластиною без бетонної стяжки.

**Основна частина.** Для підтвердження ефективності системи з алюмінієвою пластиною було виконано чисельне моделювання процесів теплообміну між теплоносієм (водою) та повітрям над фрагментом системи на рис. 1.

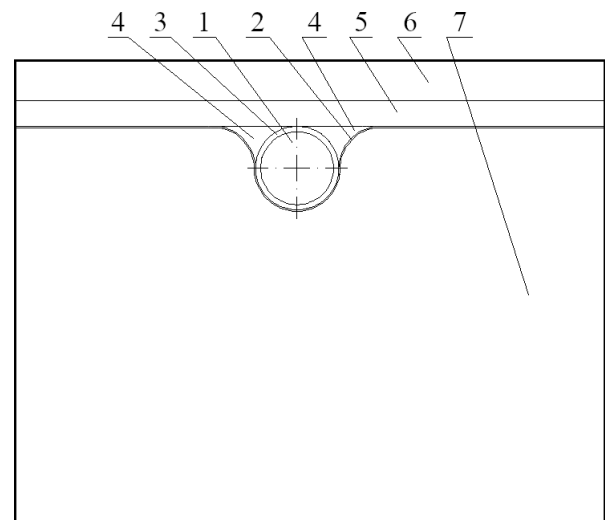


Рис. 1. Розрахункова область у центральній частині перерізу:

- 1 – вхід теплоносія до контура опалення;
- 2 – алюмінієва теплоізоляційна пластинка завтовшки 0,2 мм;
- 3 – труба полімерна Ø16×2 мм;
- 4 – повітряний прошарок;
- 5 – клей для плитки (або підкладка під ламінат);
- 6 – керамічна плитка (або ламінат) завтовшки 8 мм;
- 7 – екструдований пінополістирол

Розрахунок проводився на основі системи рівнянь імпульсу й енергії. Система диференціальних рівнянь, що характеризують процес теплообміну та гідродинаміки в системі водяного підлогового опалення, складається з рівняння нерозривності, руху й енергії для рідини, а також рівняння теплопровідності для *i*-го шару підлоги. У моделі використовувалися наступні припущення:

- усі матеріали гомогенні, а їхні теплофізичні властивості зберігають постійні значення (табл.1);

Таблиця 1

Характеристики матеріалів системи підлогового опалення [9]

№ з/п	Найменування матеріалу	Товщина, мм	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Питома теплоємність $c_p$ , кДж/(кг·К)
1	Екструдований пінополістирол	80	40	0,031	1,34
2	Алюміній	0,2	2700	200	920
3	Підкладка під ламінат	3	250	0,05	0,9
4	Ламінат	8	940	0,2	1,5
5	Клей для плитки	5	1600	0,47	0,84
6	Плитка керамічна для підлоги	8	2000	0,89	0,88
7	Труба РЕХ-А	2	1500	0,43	2,3

- вважається, що неврахування граничних ділянок повороту труб не вплине суттєво на результат розрахунку.

На поверхні підлоги було задано граничні умови третього роду з коефіцієнтом тепловіддачі 8 Вт/(м<sup>2</sup>·К) і температурою навколишнього середовища  $T_{зов}$ , К. Ступінь чорноти матеріалу  $\epsilon = 0,9$ .

На всіх бокових поверхнях (входу і виходу теплоносія) задавались умови симетрії. На нижній поверхні фрагменту було задано граничні умови постійної температури 283,15 К (10 °С). Температура води на вході становить  $T_v$ , К, а витрата –  $Q_v$ , м<sup>3</sup>/год.

Для валідації моделі теплої підлоги були використанні дані роботи [9]. Розрахунок виконано для стаціонарного режиму експлуатації системи підлогового опалення. Чисельне моделювання проводилося при ламінарному режимі течії теплоносія (води) в трубі.

Серію експериментів було проведено на лабораторному стенді в Інституті технічної теплофізики НАН України [9]. Дані експерименту порівнювались з даними теплофізичного моделювання (рис. 2).

Як видно з рисунку, розрахунок показує дещо вищі значення середнього за поверхнею теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>, з поверхні ділянки. Це може бути пов'язано з теплофізичними властивостями матеріалів або з обмеженнями моделі. Однак, у цілому модель правильно описує процеси, що відбуваються в теплій підлозі сухого способу монтажу.

У роботі аналізується вплив таких параметрів як товщина теплоізоляції  $\delta_{ізол}$ , м, витрата  $q_v$ , м<sup>3</sup>/год, та температура теплоносія  $T_v$ , К. Розглянуто два варіанти типу фінішного покриття: керамічна плитка та ламінат (рис. 3...5).

За даними рис. 3 збільшення температури теплоносія на кожні 10 К за інших рівних умов збільшує тепловий потік з одиниці поверхні системи підлогового опалення приблизно на 13 %

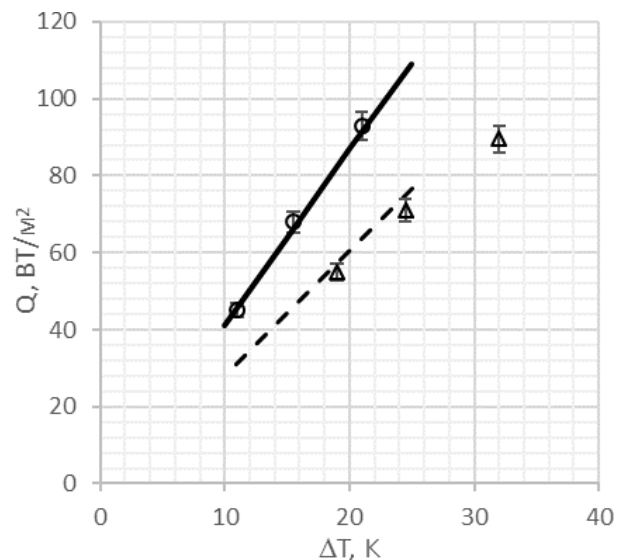


Рис. 2. Залежність густини теплового потоку з поверхні підлоги, Вт/м<sup>2</sup>, від середньої різниці температури води та повітря в приміщенні  $\Delta T$ , К:

- результати розрахунку при використанні ламінату;
- — — те ж при використанні керамічної плитки;
- Δ – результати експерименту з використанням ламінату;
- – те ж з використанням керамічної плитки

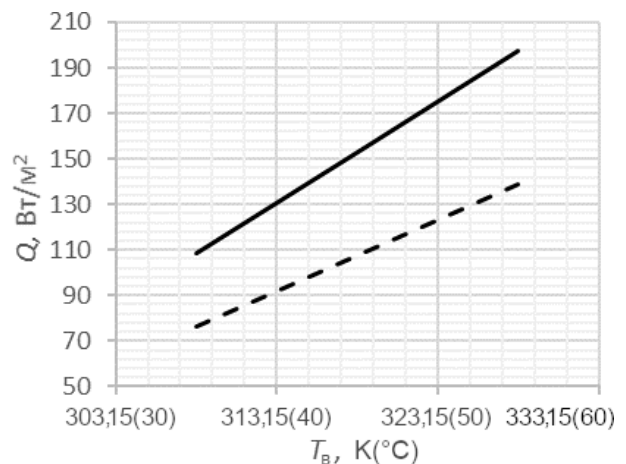


Рис. 3. Залежність густини теплового потоку з поверхні підлоги, Вт/м<sup>2</sup>, від температури води в опалювальному контурі  $T_v$ , К:

- результати розрахунку при використанні ламінату;
- — — те ж при використанні керамічної плитки

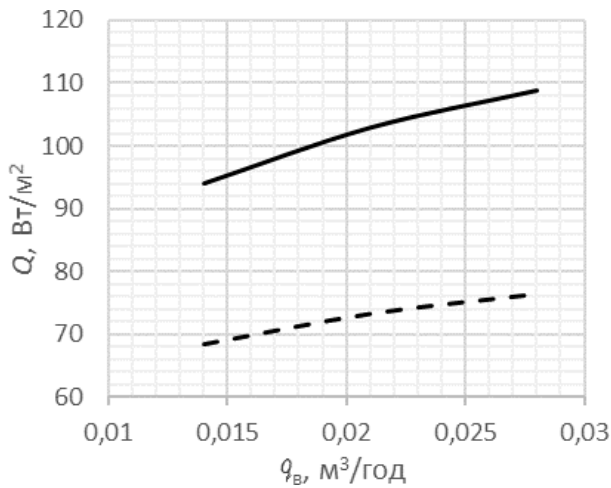


Рис. 4. Залежність густини теплового потоку  $Q$ , Вт/м<sup>2</sup>, з одиниці поверхні теплої підлоги сухого способу монтажу від витрати води  $q_v$ , м<sup>3</sup>/год, в опалювальному контурі:  
 - - - результати розрахунку при використанні ламінату;  
 — — те ж при використанні керамічної плитки

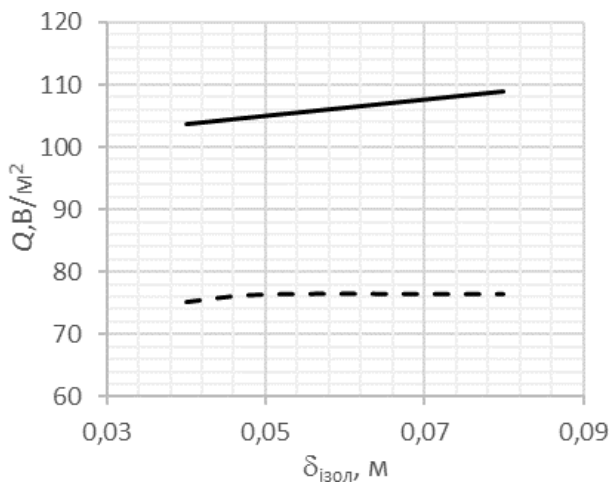


Рис. 5. Залежність густини теплового потоку  $Q$ , Вт/м<sup>2</sup>, з одиниці поверхні теплої підлоги сухого способу монтажу від товщини плити пінополістиролу  $\delta_{\text{ізол}}$ , м:  
 - - - результати розрахунку при використанні ламінату;  
 — — те ж при використанні керамічної плитки

при використанні керамічної плитки й 11 % при використанні ламінату як фінішного покриття.

За результатами досліджень можна зробити такі висновки: збільшення вдвічі витрати теплоносія за інших рівних умов збільшує тепловий потік з одиниці поверхні системи підлогового опалення на 13 % при використанні

керамічної плитки та 10 % при використанні ламінату як фінішного покриття.

Зі збільшенням удвічі товщини теплоізоляції під системою (з 40 мм до 80 мм) тепловий потік з поверхні підлоги за умови однакової температури на нижній межі області розрахунку збільшується на

- 4 % при використанні керамічної плитки;
- 1,6 % при використанні ламінату.

Результати показують можливість застосування розглянутих систем як у житлових, так і в нежитлових приміщеннях для енергоефективного опалення. Вирівнювання густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>, за поверхнею підлоги завдяки алюмінієвій теплорозподільній пластині позитивно впливає на розподіл теплоти та зменшує термічні напруження у фінішному покритті.

**Висновки.** Систему підлогового опалення сухого монтажу з алюмінієвою теплорозподільною пластиною можливо використовувати в системах опалення житлових і нежитлових приміщень. Алюмінієва теплорозподільна пластина суттєво впливає на теплообмінні процеси в системі. Завдяки ній відбувається вирівнювання густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>, у площині поверхні підлоги. Це позитивно впливає на розподіл теплоти та зменшує термічні напруження у фінішному покритті. Використання керамічної плитки збільшує загальну ефективність теплообміну системи із повітрям приміщення. Збільшення товщини плити пінополістиролу, м, збільшує величину густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>, з поверхні теплої підлоги. До збільшення густини теплового потоку із поверхні підлоги також призводить збільшення температури теплоносія, К, та його витрати, м<sup>3</sup>/год.

**Перспективи подальших досліджень.** У подальшому інтерес представляє чисельне моделювання процесів теплообміну між теплоносієм (водою) та повітрям над фрагментом системи в нестационарній постановці, з метою визначення часу, с, виходу системи на квазістационарний режим.

### Література

1. Weitzmann P. Modelling floor heating systems using a validated two dimensional ground-coupled numerical model / P. Weitzmann, J. Kragh, P. Roots, S. Svendsen // Building and Environment. – 2005. – Vol. 40. – No 2. – P. 153–163. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.07.010.
2. Basok B. I. Computational modeling of the heat exchange between the heat-transport medium and the air in a room with floor heating / B. I. Basok, A. N. Nedbailo, M. P. Novitskaya, M. V. Tkachenko, S. M. Goncharuk // Journal of Engineering Physics and Thermophysic. – 2013. – Vol. 86. – No 2. – P. 418–423. doi:10.1007/s10891-013-0850-y.
3. Sattari S. A parametric study on radiant floor heating system performance. / S. Sattari., B. Farhanieh // Renewable Energy. – 2006. – Vol. 31. – No10. – P. 1617-1626. doi:10.1016/j.renene.2005.09.009.
4. Comini G. Thermal analysis of floor heating panels / G. Comini, C. Nonino. // Numerical Heat Transfer. Part A:

Applications. –1994. – Vol. 26. – No5. – P.537-550. doi: 10.1080/10407789408956008.

5. Yanfeng Liu. Study on heat transfer process for in-slab heating floor / Yanfeng Liu, Dengjia Wang, Jiaping Liu // *Building and Environment*. – 2012. – Vol. 54. – p. 77-85. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.007.

6. Xing Jin. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system / Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yajun Luo // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – No10. – P. 1753-1758. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.011

7. Dongliang Zhang. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system / Dongliang Zhang, Ning Cai, Zijie Wang // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 61. – p. 260-266. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.016.

8. Werner-Juszczuk A. J. Experimental and numerical investigation of lightweight floor heating with metallised polyethylene radiant sheet / A. J. Werner-Juszczuk // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 177. – P. 23-32. doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.011.

9. Basok B. Research into energy efficiency of the underfloor heating system, assembled dry / B. Basok, M. Tkachenko, A. Nedbailo, I. Bozhko // *Technology audit and production reserves*. – 2018.– Vol. 41. – No3/1. – P. 52-57. doi:10.15587/2312-8372.2018.135783.

10. Qiu L. Analyses on Two Paving Types of Floor Heating / L. Qiu, Q. Li. // *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Changsha. – 2011. – P. 1431-1433. doi:10.1109/CDCIEM.2011.527.

11. Thomas S. Model validation of a dynamic embedded water base surface heat emitting system for buildings / S. Thomas, P. Franck, P. André // *Building Simulation*. – 2011. – Vol. 4. – P. 41–48. doi:10.1007/s12273-011-0025-8

### References

1. Weitzmann P., Kragh J, Roots P, Svendsen S. “Modelling floor heating systems using a validated two dimensional ground-coupled numerical model.” *Building and Environment*, Vol. 40, No 2, 2005, P. 153–163. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.07.010.

2. Basok B. I., Nedbailo A. N., Novitskaya M. P., Tkachenko M. V., Goncharuk S. M. “Computational modeling of the heat exchange between the heat-transport medium and the air in a room with floor heating.” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 86, No 2, 2013, P. 418–423. doi:10.1007/s10891-013-0850-y.

3. Sattari S., Farhanieh B. “A parametric study on radiant floor heating system performance.” *Renewable Energy*, Vol. 31, No10, 2006, P. 1617-1626. doi:10.1016/j.renene.2005.09.009.

4. Comini G., Nonino C. “Thermal analysis of floor heating panels.” *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, Vol. 26, No5, 1994, P.537-550. doi: 10.1080/10407789408956008.

5. Yanfeng Liu, Dengjia Wang, Jiaping Liu. “Study on heat transfer process for in-slab heating floor.” *Building and Environment*, Vol. 54, 2012, P. 77-85. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.007.

6. Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yajun Luo. “A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system.” *Energy and Buildings*, Vol. 42, No10, 2010, P. 1753-1758. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.011

7. Dongliang Zhang, Ning Cai, Zijie Wang. “Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system.” *Energy and Buildings*, Vol. 61, 2013, P. 260-266. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.016.

8. Werner-Juszczuk A. J. “Experimental and numerical investigation of lightweight floor heating with metallised polyethylene radiant sheet.” *Energy and Buildings*, 2018, Vol. 177, P. 23-32. doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.011.

9. Basok B., Tkachenko M., Nedbailo A., Bozhko I. “Research into energy efficiency of the underfloor heating system, assembled dry.” *Technology audit and production reserves*, Vol. 41, No3/1, 2018, P. 52-57. doi:10.15587/2312-8372.2018.135783.

10. Qiu L., Li Q. “Analyses on Two Paving Types of Floor Heating.” *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Changsha, 2011, P. 1431-1433. doi:10.1109/CDCIEM.2011.527.

11. Thomas S., Franck P., André P. “Model validation of a dynamic embedded water base surface heat emitting system for buildings.” *Building Simulation*, 2011, Vol. 4, P. 41–48. doi:10.1007/s12273-011-0025-8

УДК 697.1

## Теплофизическое моделирование и исследование теплотехнических характеристик тёплого водяного пола сухого способа монтажа

Б. И. Басок<sup>1</sup>, М. П. Новицкая<sup>2</sup>, С. М. Гончарук<sup>3</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина, [basok@ittf.kiev.ua](mailto:basok@ittf.kiev.ua),  
ORCID:0000-0002-8935

<sup>2</sup>к.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина, [mmarina@ukr.net](mailto:mmarina@ukr.net),  
ORCID: 0000-0003-2867-101X

<sup>3</sup>к.т.н., ведущий научный сотрудник. Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина,  
[goncharuk-s@ukr.net](mailto:goncharuk-s@ukr.net), ORCID: 0000-0002-5609-7337

**Аннотация.** Использование систем напольного отопления является эффективным способом достижения теплового комфорта пользователей в энергоэффективных зданиях. В работе приведены теоретические исследования теплотехнических параметров системы водяного тёплого пола сухого способа укладки. Система сухого способа монтажа, рассматриваемая в работе, состоит из утеплителя (пенополистирол) на котором расположены трубы системы отопления, контактирующие с алюминиевой теплораспределительной пластиной. Система покрыта сверху финишным покрытием. Расчёт проводился на основе системы уравнений импульса и энергии и выполнен для стационарного режима эксплуатации системы напольного отопления. Валидация модели выполнена с использованием результатов экспериментальных исследований. В работе сделаны выводы, что, данную конфигурацию системы напольного отопления, можно использовать в системах отопления жилых и нежилых помещений. Алюминиевая теплораспределительная пластина существенно влияет на теплообменные процессы в системе. Благодаря алюминиевым теплораспределительным пластинам происходит выравнивание теплового потока в плоскости поверхности пола, что положительно влияет на тепловое распределение и уменьшает термические напряжения в финишном покрытии. Использование керамической плитки увеличивает общую эффективность теплообмена системы с воздухом помещения. Увеличение толщины плиты пенополистирола увеличивает величину плотности теплового потока с поверхности тёплого пола. К увеличению плотности теплового потока с поверхности пола также приводит увеличение расхода и температуры теплоносителя.

**Ключевые слова:** тёплый пол, алюминиевая теплораспределительная пластина, численное моделирование, сухой способ монтажа.

UDC 697.1

## Numerical simulation and study of thermal characteristics of a lightweight floor heating system

B. Basok<sup>1</sup>, M. Novitska<sup>2</sup>, S. Goncharuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, professor. Institute of engineering thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [basok@ittf.kiev.ua](mailto:basok@ittf.kiev.ua),  
ORCID:0000-0002-8935

<sup>2</sup> PhD, senior researcher. Institute of engineering thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [mmarina@ukr.net](mailto:mmarina@ukr.net),  
ORCID: 0000-0003-2867-101X

<sup>3</sup> PhD, leading researcher. Institute of engineering thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [goncharuk-s@ukr.net](mailto:goncharuk-s@ukr.net),  
ORCID: 0000-0002-5609-7337

**Abstract.** The use of underfloor heating systems is an effective way to achieve thermal comfort for users in energy-efficient buildings. There are two kinds of such systems: traditional and dry-assembled. The first type is researched more deeply than the second one. The paper presents theoretical studies of the thermotechnical parameters of a water underfloor dry-assembled heating system. The design of the underfloor dry-assembled heating system, considered in the work, consists of a heat insulation (expanded polystyrene), on which the pipes of the heating system are located, in contact with an aluminum heat distribution plate. The system is covered with floor finishing. The calculation for a stationary operating mode of the floor heating system was carried out on the basis of a system of equations for momentum and energy. The model was validated using the results of experimental studies. The calculation results cause some overestimation of the experimental data, possibly, because of deviations in thermotechnical characteristics of materials. But the simulation model correctly estimates the behaviour of the system at change of its parameters. The paper concludes that this configuration of the underfloor heating system can be used in heating systems for residential and non-residential premises. The aluminum heat distribution plate significantly affects the heat transfer processes in the system. Due to the plate, the heat flux is made uniform in the plane of the floor surface, which has a positive effect on heat distribution and reduces thermal tension in the finish coating. The use of ceramic tiles increases the overall heat exchange efficiency of the system with the room air. An increase in the thickness of the expanded polystyrene board increases the value of the heat flux from the surface of the heated floor. An increase in the flow rate and temperature of the heat carrier also cause an increase in the density of heat flux from the floor surface.

**Keywords:** underfloor heating, aluminum heat distribution plate, numerical simulation, dry-assembly.

Надійшла до редакції / Received 31.10.2020

УДК 697.942

## Підвищення ефективності очищення газових викидів від ливарного виробництва

Ю. О. Бурда<sup>1</sup>, А. Д. Череднік<sup>2</sup>, І. О. Редько<sup>3</sup>, Ю. О. Півненко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, [burda.yurii.1991@gmail.com](mailto:burda.yurii.1991@gmail.com), ORCID 0000-0003-3470-1334

<sup>2</sup> к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, [artemcherednic@gmail.com](mailto:artemcherednic@gmail.com), ORCID 0000-0002-3385-0584

<sup>3</sup> д.т.н., доц. Харківський Національний Університет Міського Господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net), ORCID: 0000-0002-9863-4487

<sup>4</sup> к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, [pivnenko.yura@gmail.com](mailto:pivnenko.yura@gmail.com), ORCID 0000-0002-6675-2649

*Анотація. Робота присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності очищення технологічних газів у скруберах насадкового типу з метою зниження викидів шкідливих речовин і твердих домішок до атмосфери та підвищення техніко-економічних показників систем мокрого газоочищення. Для цього було розроблено трикутну насадку з хрестоподібними вирізами. У роботі експериментально визначається ефективність очищення скруберам з цією насадкою. Перед очищенням виконується двоступеневе охолодження газів. Порівняння виконується з найбільш ефективними на сьогодні типами насадок для мокрого газоочищення – хордова дерев'яна і кільця Рашига. Показано, що розроблена трикутна насадка з хрестоподібними вирізами при очищенні коксового газу від CO<sub>2</sub> покращує очищення на 25 % порівняно з дерев'яною хордовою, та на 15 % – з кільцями Рашига. Це дозволяє рекомендувати її до широкого впровадження.*

*Ключові слова: газоочищення, скрубер, очищення газових викидів, атмосферне повітря, насадка.*

**Вступ.** На даний час проблема газоочищення є дуже важливою у зв'язку зі зростанням промислової потужності країн Європи.

Газова оболонка Землі захищає усе живе від ультрафіолетових променів. Проте є фактори, які погіршують стан атмосфери та потоншують цю оболонку. Зокрема такими є антропогенні викиди. Сумарно викиди в атмосферу становлять 380 тон отруйних речовин на 1 км<sup>3</sup>.

Атмосферне повітря забруднюється шляхом надходження або утворення в ньому забруднювальних речовин у концентраціях, що перевищують його природний вміст [1, 2]. Забруднювальні речовини – це різні домішки, які у певній концентрації чинять несприятливий вплив на навколишнє середовище. Підвищена концентрація багатьох з них може викликати захворювання в людей та тварин.

Одним з найбільш ефективних засобів очищення димових газів від пилу є скрубери. Вони виконують очищення завдяки взаємодії газів з водою. Розвиток цієї техніки має бути спрямований на підвищення ефективності очищення зі зменшенням витрати води та енергії.

**Актуальність дослідження.** Очищення викидів до атмосфери є важливим питанням в сучасному світі, що пов'язане зі здоров'ям людей та інших живих істот.

### Останні дослідження та публікації.

Значний вклад у дослідження газоочищення, зробили вчені С. П. Титов, Г. Н. Северенц, О. Ф. Редько, О. Н. Куліш, В. Г. Назаров, С. З. Поліщук, В. П. Куц, В. Б. Довгалюк, Б. С. Сажин та ін. На даний час проблема газоочищення є однією з найважливіших для промислового комплексу України. Одним з варіантів реконструкції систем газоочищення є застосування скруберів насадкового типу.

Промислове газоочищення необхідне для видалення з газу твердих та рідких частинок, шкідливих домішок, уловлювання цінних матеріалів. Усі ці заходи потрібні для зменшення забруднення атмосферного повітря, та зниження негативного впливу на подальшу обробку газу. Очищення промислових газів є важливим завданням для чорної, кольорової металургії та інших видів промисловості [3, 4]. Саме тому поділ газових неоднорідних систем відноситься до числа широко розповсюджених основних процесів хімічної технології.

Для розширення області використання й підвищення ефективності очищення газових викидів розроблено [2] трикутну насадку з хрестоподібними вирізами (рис. 1). Її ефективність має бути підтверджена експериментально.

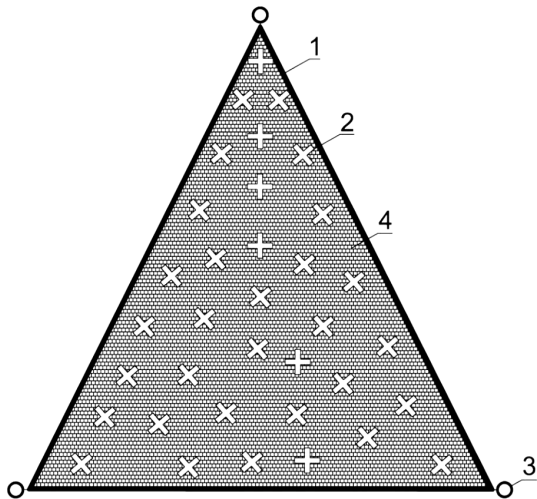


Рис. 1. Трикутна насадка з хрестоподібними вирізами:  
1 – корпус з легованої сталі; 2 – хрестоподібний отвір;  
3 – змінне кріплення; 4 – дрібна сітка, з легованої сталі

**Формулювання цілей статті.** Метою даної роботи є перевірка ефективності розробленої трикутної насадки з хрестоподібними вирізами.

**Основна частина.** У роботі порівняно ефективність розробленої трикутної насадки з хрестоподібними вирізами з її аналогами – дерев'яною хордовою та кільцями Рашига.

Завдяки розміру отворів та їхній специфічній формі трикутна насадка з хрестоподібними вирізами забезпечує довший контакт з водою, що дозволяє зменшити витрату останньої. Завдяки виконанню насадки з легованої сталі AISI 316 (10X17H13M2), вона може бути використана навіть у найбільш агресивному середовищі.

Для проведення даних промислових випробувань було використано термогігрометр-газоаналізатор CO<sub>2</sub> типу AZ – 7797 [5, 6] з високоточним NDIR (інфрачервоним) датчиком CO<sub>2</sub> та автоматичним фоновим калібруванням (W/ABC) і компенсацією відхилень при тривалій експлуатації (рис. 2 а). Діапазон вимірювання концентрації 0...9999 ppm, похибка становить ± 5 %.

При проведенні промислових випробувань коксовий газ охолоджувався за допомогою аміачної води від 750 до 80 °С. Потім він подавався до первинного газового холодильника (базового типу) безпосередньої дії, де його температура зменшувалася до 15 °С.

Випробування виконувалися при температурі навколишнього середовища 23 °С. Було проведено декілька замірів для кожного типу насадки, в типовій конструкції скрубера [7, 8].

Як робочий газ використано коксовий газ ливарного виробництва. Температура другого ступеня охолодження контролювалася манометричним термометром на рис. 2 б.

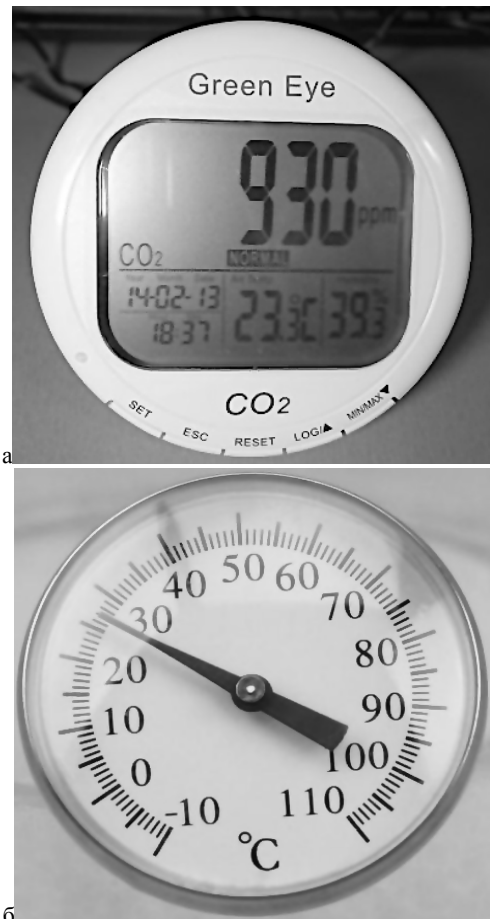


Рис.2. Вимірювальні прилади:  
а – газоаналізатор CO<sub>2</sub>; б – манометричний термометр для вимірювання температури газів після охолодження

При випробуваннях вимірювалася кількість CO<sub>2</sub> після першого ступеня охолодження та після остаточного охолодження до 15 °С. Отримано концентрацію в першому випадку 0,465 %, а у другому – 0,321 %.

Далі було отримано концентрацію CO<sub>2</sub> в охоложеному й очищеному газі (рис. 3, 4).

Найбільшу ефективність виявлено у розробленої трикутної насадки з хрестоподібними вирізами. Ця насадка підвищує ефективність очищення на 15 % порівняно з кільцями Рашига та на 25 % порівняно з дерев'яною хордовою.

Широке впровадження розробленої насадки дозволить зменшити забруднення атмосфери шкідливими виробничими викидами.

**Висновки.** Розроблена трикутна насадка з хрестоподібними вирізами при очищенні коксового газу від CO<sub>2</sub> покращує очищення на 25 % порівняно з дерев'яною хордовою, та на 15 % – кілець Рашига, які є однією з найефективніших на сьогодні насадок. Це дозволяє рекомендувати її до широкого впровадження.



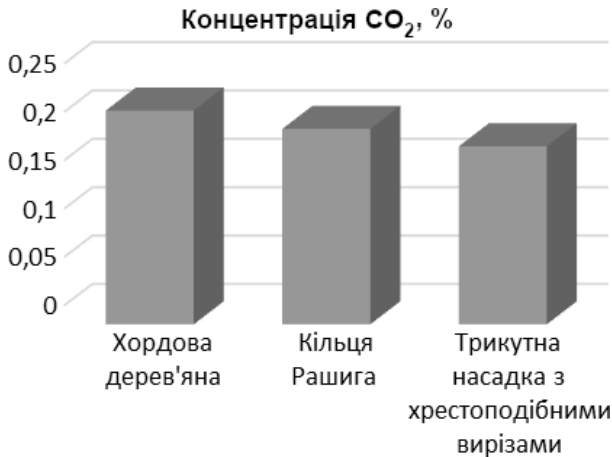


Рис. 3. Концентрація CO<sub>2</sub>, %, при використанні різних насадок (власні випробування [2])

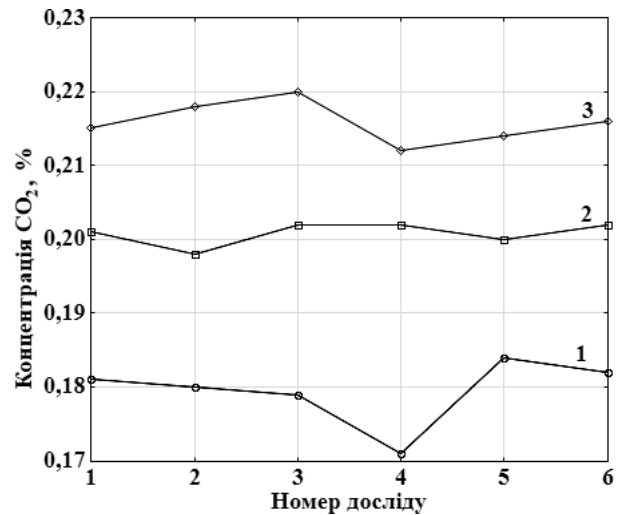


Рис. 4. Графік очищення від CO<sub>2</sub> за результатами промислових випробувань:  
 1 – трикутна насадка з хрестоподібними вирізами (власні випробування);  
 2 – кільця Рашига (власні випробування);  
 3 – кільця Рашига (випробування В. О. Проніна й О. В. Долговської [9])

**Перспективи подальших досліджень.** У подальшому планується визначити ступінь очищення газу ливарного виробництва від парів бензолу та нафталіну.

#### Література

1. Бурда Ю. О. Уловлювання частинок бензолу в коксовому газі скруберами насадкового типу / Ю. О. Бурда, О. Ф. Редько, Ю. І. Чайка // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. – 2017. – № 22. – С. 31-36.
2. Бурда Ю. О. Підвищення ефективності очистки коксового газу за рахунок впровадження трикутної насадки з хрестоподібними вирізами / Ю. О. Бурда // 29 Міжнародна науково-практична інтернет-конференція “Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації”. 2017. – № 4 (90). – С. 211-215.
3. Редько О. Ф. Дисперсність крапель у скруберах насадкового типу / Редько О. Ф., Чайка Ю. І., Ю. О. Бурда // *Науковий вісник будівництва*. – 2016. – №1. – С. 143-146.
4. Borysov N. S., Brykov V. P., Dytnerskiy Yu. I. y dr. *Osnovnyye protsessy u apparaty khymicheskoi tekhnologii: Posobyе po proektyrovaniyu*. Khymiya, 1991.
5. Козлова С. А. Оборудование для очистки газов промышленных печей / С. А. Козлова, И. М. Шалаев, О. В. Раева, А. В. Киселев. – Красноярск: СФУ, 2007. – 156 с.
6. Коробчанский И. Е. Расчёты аппаратуры для улавливания химических продуктов коксования / И. Е. Коробчанский, М. Д. Кузнецов. – Москва: Металлургия, 1972. – 296 с.
7. Вшивцев В. Г. Хроматографическое определение нафталена в аэрозолях каменноугольной смолы коксового газа / В. Г. Вшивцев, Т. К. Сафронова, Л. Г. Носова // *Вопросы технологии улавливания и переработки продуктов коксования*. – Вып. 7. – М.: Металлургия, 1978. – С. 91-93.
8. Бродович А. И. Новые схемы очистки коксового газа / А. И. Бродович, В. М. Зайченко, В. И. Мелженцева и др. // *Кокс и химия*. – 1980. – № 4. – С. 28-32.
9. Пронін В. А. Використання різних типів скруберів для очищення коксового газу / В. А. Пронін, О. В. Долговська // *Коксова промисловість*. – 2010. – № 18. – С. 13-18

#### References

1. Burda Yu., Redko O., Chaika Yu. “Ulovliuvannia chastynok benzolu v koksovomu hazi skruberamu nasadkovoho typu”. *Ventylatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia*. 2017. No. 22. P. 31-36
2. Burda Yu. O. “Pidvyshchennia efektyvnosti ochystky koksovoho hazu za rakhunok vprovadzhennia trykutnoi nasadky z khrestopodibnymy vyrizamy”. 29 Mizhnarodna naukovo-praktychna internet-konferentsiia “Tendentsiia ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii”. 2017. No. 4 (90). P. 211-215
3. Redko O. F., Chaika Yu. I., Yu. O. Burda “Dyspersnist krapel u skruberakh nasadkovoho typu”. *Naukovyi visnyk budivnytstva*. 2016. pp. 143-146
4. Dyttnersky Yu. Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology - Design Guide. M.: Chemistry, 1991. - 496 pp.
5. Kozlova S. A., Shalaev Y. M., Raeva O. V., Kyselev A. V. *Oborudovanye dlia ochystky hazov promyshlennykh pechei*. SFU, 2007.
6. Korobchanskii I. E., Kuznetsov M. D. *Raschety apparatury dlia ulavlivaniia khimicheskikh produktov kokso-*

vaniia, Metallurgii, 1972.

7. Vshivtsev V. G., Safronova T. K., Nosova L. G. "Khromatograficheskoe opredelenie naftalina v aerizoliiakh karmennougolnoi smoly koksovogo hazu." Voprosy tekhnologii ulavlivaniia i pererabotki produktov koksovaniia, 1978, Vyp. 7. P. 91-93.

8. Brodovich A. I., Zaichenko V. M., Melzhentseva V. I. i dr. "Novye skhemy ochistki koksovogo gaza." Koks i khimii, no. 4, 1980, P. 28-32.

9. Pronin V. A. Dolhovska O. V. "Vykorystannia riznykh typiv skrubberiv dlia ochyshchennia koksovoho hazu" Koksova promyslovist, 2010, No 18. P. 13-18

## УДК 697.942

### Повышение эффективности очистки газовых выбросов от литейного производства

Ю. А. Бурда<sup>1</sup>, А. Д. Чередник<sup>2</sup>, И. О. Редько<sup>3</sup>, Ю. А. Пивненко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, [burda.yurii.1991@gmail.com](mailto:burda.yurii.1991@gmail.com), ORCID 0000-0003-3470-1334

<sup>2</sup> к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, [artemcherednic@gmail.com](mailto:artemcherednic@gmail.com) ORCID 0000-0002-3385-0584

<sup>3</sup> д.т.н., доц. Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, Г. Харьков, Украина, [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net), ORCID: 0000-0002-9863-4487

<sup>4</sup> к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, [pivnenko.yura@gmail.com](mailto:pivnenko.yura@gmail.com), ORCID 0000-0002-6675-2649

***Аннотация.** Работа посвящена актуальной проблеме повышения эффективности очистки технологических газов в скрубберах насадочного типа с целью снижения выбросов вредных веществ и твёрдых примесей в атмосферу и повышения технико-экономических показателей систем мокрой газоочистки. Для этого была разработана треугольная насадка с крестообразными вырезами. В работе экспериментально определяется эффективность очистки скруббером с этой насадкой. Перед очисткой выполняется двухступенчатое охлаждение газов. Сравнение выполняется с наиболее эффективными на сегодня типами насадок для мокрой газоочистки – хордовая деревянная и кольца Рашига. Показано, что разработанная треугольная насадка с крестообразными вырезами при очистке коксового газа от CO<sub>2</sub> улучшает очистку на 25 % по сравнению с деревянной хордовой, и на 15 % – с кольцами Рашига. Это позволяет рекомендовать её для широкого внедрения.*

*Ключевые слова:* газоочистка, скруббер, очистка газовых выбросов, атмосферный воздух, насадка.

## UDC 697.942

### Improving the efficiency of cleaning gas emissions from foundry

Y. Burda<sup>1</sup>, A. Cherednik<sup>2</sup>, I. Redko<sup>3</sup>, Yu. Pivnenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, [burda.yurii.1991@gmail.com](mailto:burda.yurii.1991@gmail.com), ORCID 0000-0003-3470-1334

<sup>2</sup> Ph.D, assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, [artemcherednic@gmail.com](mailto:artemcherednic@gmail.com) ORCID 0000-0002-3385-0584

<sup>3</sup> Dr.Hab., assoc. prof. Kharkiv National University of Municipal Economy named after OHM. Beketova, Kharkiv, Ukraine, [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net), ORCID: 0000-0002-9863-4487

<sup>4</sup> Ph.D assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, [pivnenko.yura@gmail.com](mailto:pivnenko.yura@gmail.com), ORCID 0000-0002-6675-2649

***Annotation.** The work is devoted to the topical problem of increasing the efficiency of cleaning process of gases in packed-type scrubbers in order to reduce emissions of harmful substances and solid impurities into the atmosphere and improve the technical and economic indicators of wet gas cleaning systems. For this, a triangular cross-cut packing has been developed. Due to the size of the holes and their specific shape, the triangular packing provides longer contact of the packaging with water, which reduces water consumption. The packing is made of alloy steel AISI 316, so it can be used even in the most aggressive environment. In the work, the efficiency of cleaning with a scrubber with this packing is experimentally determined. The tests were performed at an ambient temperature of 23 °C. Several measurements were made for each type of*

*packing, in a typical scrubber design. To conduct these industrial tests, a thermohygrometer-carbon dioxide gas analyzer AZ-7797 was used with high-precision NDIR (infrared) sensor; automatic background calibration (W/ABC), and compensation for deviations during long-term operation. The concentration measurement range is 0-9999 ppm with an error of  $\pm 5\%$ . The gases were cooled in two stages. At first, they were cooled with ammonia water from 750 to 80 °C. Then they were fed to a primary gas refrigerator (basic type) of direct action, where its temperature were falled to 15 °C. Carbon dioxide concentration was measured after the first stage of cooling, after the final cooling, and after the cleaning process. The comparison is carried out with the most effective types of packing for wet gas cleaning today – chordal wood and Raschig rings. It is shown that the developed triangular packing with cross-shaped notches during the purification of coke oven gas from carbon dioxide improves the purification by 25 % in comparison with the wooden chord one, and by 15 % - with Raschig rings. This allows us to recommend it for widespread implementation.*

*Key words: gas cleaning, scrubber, gas emission cleaning, atmospheric air, packing.*

Надійшла до редакції / Received 25.05.2020

УДК 69.03

## Моделювання теплопередачі у вузлі примикання горищного перекриття до зовнішніх огороджувальних конструкцій

Г. С. Ратушняк<sup>1</sup>, О. Ю. Горюн<sup>2</sup>, А. О. Лялюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [ratusnak@gmail.com](mailto:ratusnak@gmail.com), ORCID 0000-0001-9656-5150

<sup>2</sup> асп. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [oksana2718@ukr.net](mailto:oksana2718@ukr.net), ORCID 0000-0002-3624-2293

<sup>3</sup> магістрант Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [lyalyuk74@gmail.com](mailto:lyalyuk74@gmail.com), ORCID 0000-0002-4803-1629

**Анотація.** Численні дослідження та тепловізійні обстеження багатоповерхових житлових будинків, вказують на характерні місця з підвищеними тепловтратами. У будинках, побудованих з дотриманням сучасних вітчизняних нормативних вимог щодо термічного опору огороджувальних конструкцій, фактичний термічний опір стін та вікон збігається з нормативним. Проте залишаються вузли елементів зовнішніх огороджувальних конструкцій з підвищеними тепловтратами. Утеплення вузлів примикання дозволяє збільшити термічний опір зовнішніх огороджувальних конструкцій. З метою підвищення енергоефективності будівлі, запропоновано конструктивне виконання утеплення вузла примикання перекриття на технічному горищі, що захищено патентом на корисну модель. Проаналізовано лінійні коефіцієнти теплопередачі вузла примикання перекриття на горищі. Виявлено, що в нормативних документах не вказано подібної інформації. Зменшення тепловтрат досягається за рахунок улаштування додаткових шарів утеплення у вигляді аерогелевої плити в місці примикання перекриття до зовнішніх огороджувальних конструкцій. Аналіз енергоефективності запропонованого конструктивного виконання вузла примикання горищного перекриття як «містка холоду» виконано за результатами математичного моделювання в програмному комплексі DAMWERK. За результатами моделювання встановлено розподіл температури у вузлі примикання перекриття на технічному горищі. Визначено лінійний коефіцієнт теплопередачі рекомендованого вузла примикання перекриття на технічному горищі, значення якого варто враховувати при проектуванні будівлі. Отримані результати є підтвердженням доцільності впровадження запропонованого конструктивного виконання вузла примикання перекриття на технічному горищі, що дозволить підвищити енергоефективність теплоізоляційної оболонки будівлі.

**Ключові слова:** термічний опір, огороджувальні конструкції, вузол примикання, перекриття, горище, енергоощадність, коефіцієнт теплопередачі.

**Вступ.** Державна політика у сфері забезпечення енергетичної ефективності передбачає реалізацію вискоелективних технологій при влаштуванні утеплення фасадів будинків. Результатом має бути зменшення споживання енергоносіїв на опалення в холодний період року [1].

Причиною нерівномірності теплопередачі крізь огороджувальні конструкції слугують теплопровідні включення. Вони призводять до зниження температури огороджувальних конструкцій усередині приміщення, що створює умови для появи конденсату, а також додаткових тепловтрат. Вузол примикання горищного перекриття відноситься до теплопровідних включень, або «містків холоду».

Удосконалення конструктивного виконання вузлів примикання горищного перекриття до зовнішніх стінових огороджувальних конструкцій дозволить підвищити енергоефективність житлових будинків за рахунок зменшення тепловтрат у зонах теплопровідних включень [2].

**Актуальність дослідження.** Основні технічні заходи для підвищення енергоефективності будівлі:

- утеплення фасадів зовнішніх стін;
- утеплення перекриття останнього поверху;
- утеплення підвальних приміщень;
- встановлення енергоощадних вікон.

Найважні технології теплоізоляції не завжди є ефективними при влаштуванні окремих вузлів елементів зовнішніх огороджувальних конструкцій будівель [3, 4, 5, 6]. Нормативні документи не в повній мірі враховують інформацію щодо теплопровідних включень вузлів примикання, характерних для більшості наявних будівель.

Актуальним постає питання знаходження точкових і лінійних коефіцієнтів для теплопровідних включень з утепленням [2]. При розрахунку енергоефективності сучасних будівель використовують табличні значення коефіцієнтів для застарілих конструкцій. У зв'язку із цим актуальним є дослідження закономірностей розподілу значень лінійних коефіціє-

нтів теплопередачі в конструктивних елементах теплоізоляційної оболонки будівель.

**Останні дослідження та публікації.** Теплопровідне включення – це елемент будівельної огорожувальної конструкції з однорідним термічним опором, що значно змінюється в разі:

- повного або часткового проникнення в будівельну огорожувальну конструкцію матеріалів, які відрізняються коефіцієнтами теплопровідності;
- зміною товщини виробу або різниці між внутрішньою та зовнішньою площами, які виникають у з'єднаннях [2].

Підвищенню енергоефективності будинків за рахунок утеплення вузлів примикання конструктивних елементів теплоізоляційної оболонки будівель присвятили дослідження С. В. Зіменко [7], В. О. Плоский [8], Г. Г. Фаренюк [9], Сінь Чень (Xin Chen) [10], К. Дубі (Kankana Dubey), В. Б. Довгалюк [11], В. М. Желих, О. В. Приймак [12], Т. Ткаченко, О. В. Семко [13], О. Т. Возняк [14]. У даних роботах для аналізу використано результати розрахунків температурних полів.

Виконано аналіз рівня теплозахисту перекриття конструкцій. Спостерігався суттєвий вплив теплопровідних включень на термо-

стійкість після термомодернізації холодного покрівельного перекриття [15]. Попередні дослідження вказують на те що теплопровідні включення значною мірою знижують опір теплопередачі огорожувальних конструкцій [8].

**Формулювання цілей статті.** За результатами моделювання теплопередачі у вузлі примикання горищного перекриття обґрунтувати доцільність вдосконалення конструктивних елементів теплоізоляційної оболонки будівель у ймовірних місцях «містків холоду».

**Основна частина.** Результати тепловізійного обстеження житлових багатоповерхових будинків свідчать про наявність «містків холоду» у вузлах примикання елементів огорожувальних конструкцій будівлі. Встановлено місця та величини тепловтрат різних елементів огорожувальних конструкцій [5]. Одним із таких конструкцій є вузол примикання горищного перекриття. Результати обстеження наведено на рис. 1.

З метою зменшення тепловтрат крізь елементи теплоізоляційної оболонки будівлі запропоновано спосіб конструктивного влаштування утеплення вузлів примикання огорожувальних конструкцій [15] на горищі (рис. 2).

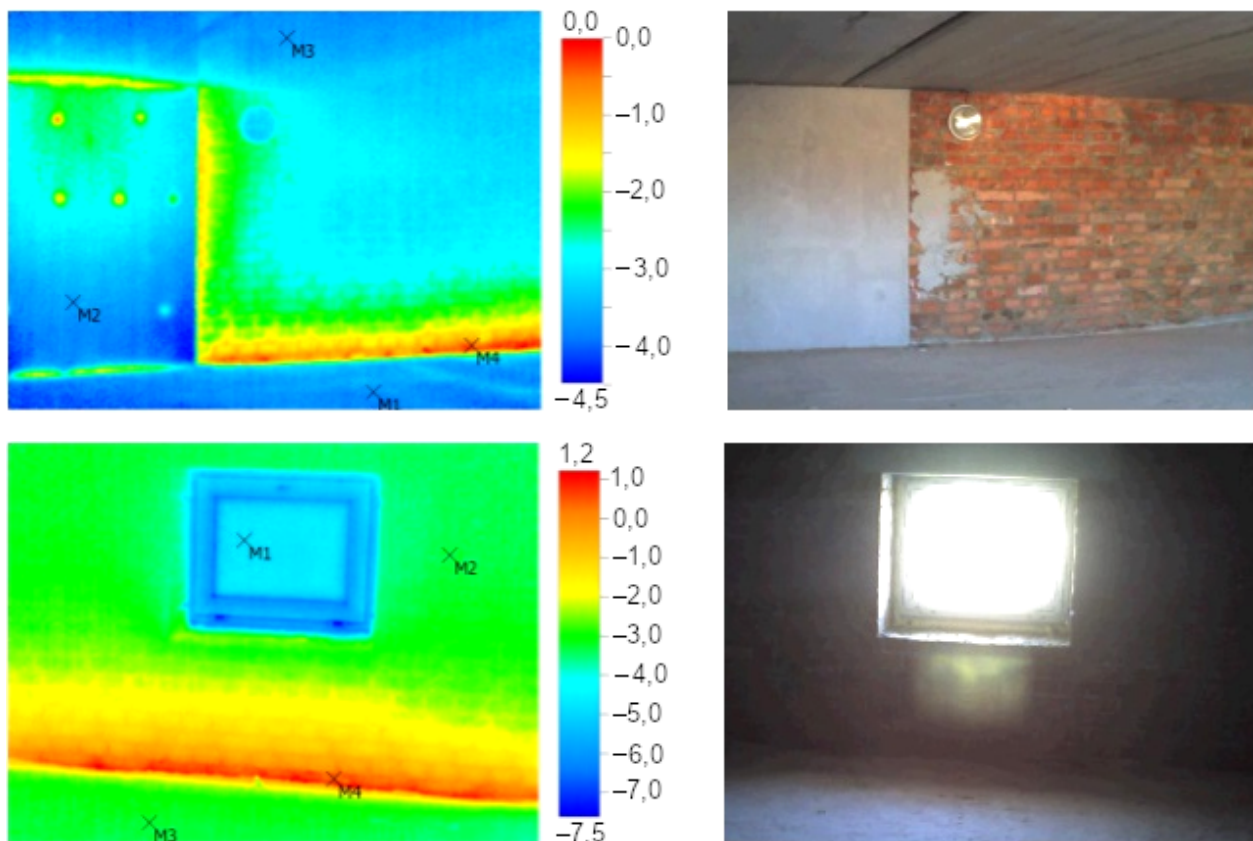


Рис. 1. Термограми десятиповерхового житлового будинку на вул. Академіка Ющенка, 5 у м. Вінниця, який введено в експлуатацію у 2016 році

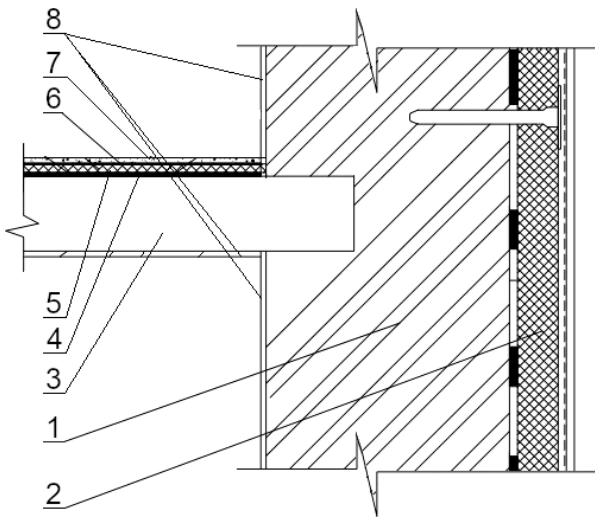


Рис. 2. Конструктивне виконання утеплення вузла примикання на технічному горищі:  
1 – зовнішня стіна; 2 – система утеплення;  
3 – горизонтальна плита перекриття; 4 – шар пароізоляції; 5 – утеплювач – аерогелева плита;  
6 – поліетиленова плівка; 7 – армована стяжка з цементно-піщаного розчину; 8 – теплоізоляційна шпаклівка

Утеплення вузла примикання перекриття на технічному горищі здійснюється таким чином [15]. Після улаштування рівної зовнішньої стіни 1 встановлюють додатковий шар утеплювача 2, який перекриває стик перекриття.

З внутрішнього боку стіни в місці примикання до неї горизонтальній плиті перекриття 3 на ній улаштовують шар пароізоляції 4 та утеплювач у вигляді аерогелевої плити 5.

Згори плити 5 накладають поліетиленову плівку 6, на яку наносять армовану стяжку з цементно-піщаного розчину 7. На вертикальну поверхню внутрішнього боку стіни 1 та нижню сторону горизонтальній плиті перекриття 3 наносять теплоізоляційну шпаклівку 8.

Запропоноване конструктивне виконання вузла примикання дозволить підвищити приведені опір теплопередачі,  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$ , та температуру всередині приміщення,  $^{\circ}\text{C}$ . Це буде запобігати утворенню конденсату в місці примикання перекриття до зовнішньої стіни огорожувальної конструкції будівлі.

Для аналізу ефективності запропонованого конструктивного вузла примикання виконано моделювання теплопередачі у вузлі примикання горищного перекриття до зовнішньої стіни (рис.3) та розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі з використанням програмного забезпечення DAMWERK. Вихідні дані:

- стіна цегляна завтовшки  $\delta_1 = 500$  мм з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1 = 0,71$   $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

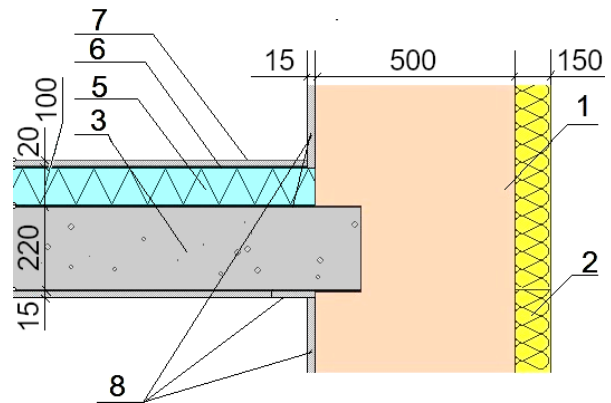


Рис. 3. Розрахункова схема для моделювання теплопередачі у вузлі примикання на технічному горищі

- система утеплення з мінеральної вати завтовшки  $\delta_2 = 150$  мм, з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_2 = 0,045$   $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- плита перекриття завтовшки  $\delta_3 = 220$  мм з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_3 = 2,04$   $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- аерогелева плита завтовшки  $\delta_4 = 100$  мм з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_4 = 0,02$   $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- цементно-піщаний розчин завтовшки  $\delta_5 = 20$  мм з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_5 = 0,93$   $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,
- теплоізоляційна шпаклівка «Тепловер» завтовшки  $\delta_6 = 15$  мм з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_6 = 0,07$   $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Температура всередині приміщення становить  $+20$   $^{\circ}\text{C}$ , температуру на горищі прийнято мінус  $3$   $^{\circ}\text{C}$ , температура зовні дорівнює мінус  $20$   $^{\circ}\text{C}$ . Результатом моделювання є розподіл температури у вузлі примикання перекриття на технічному горищі до зовнішніх огорожувальних конструкцій, який наведено на рис. 4.

Розподіл температури,  $^{\circ}\text{C}$ , у вузлі примикання перекриття на технічному горищі ілюструє, що використання сучасних матеріалів утеплення у вигляді аерогелевої плити та теплоізоляційної шпаклівки дозволяє зменшити тепловтрати та скоригувати рух теплового потоку (рис. 5).

За результатами розрахунку температурних полів на внутрішній поверхні стіни в місці примикання плити горищного перекриття встановлено збільшення температури,  $^{\circ}\text{C}$ . Зміна температури на внутрішній поверхні стіни призводить до зміни теплового потоку,  $\text{Вт}$ , що проходить крізь вузол примикання.

Температурне поле (рис. 5) показує, як змінюється температура у вузлі примикання.

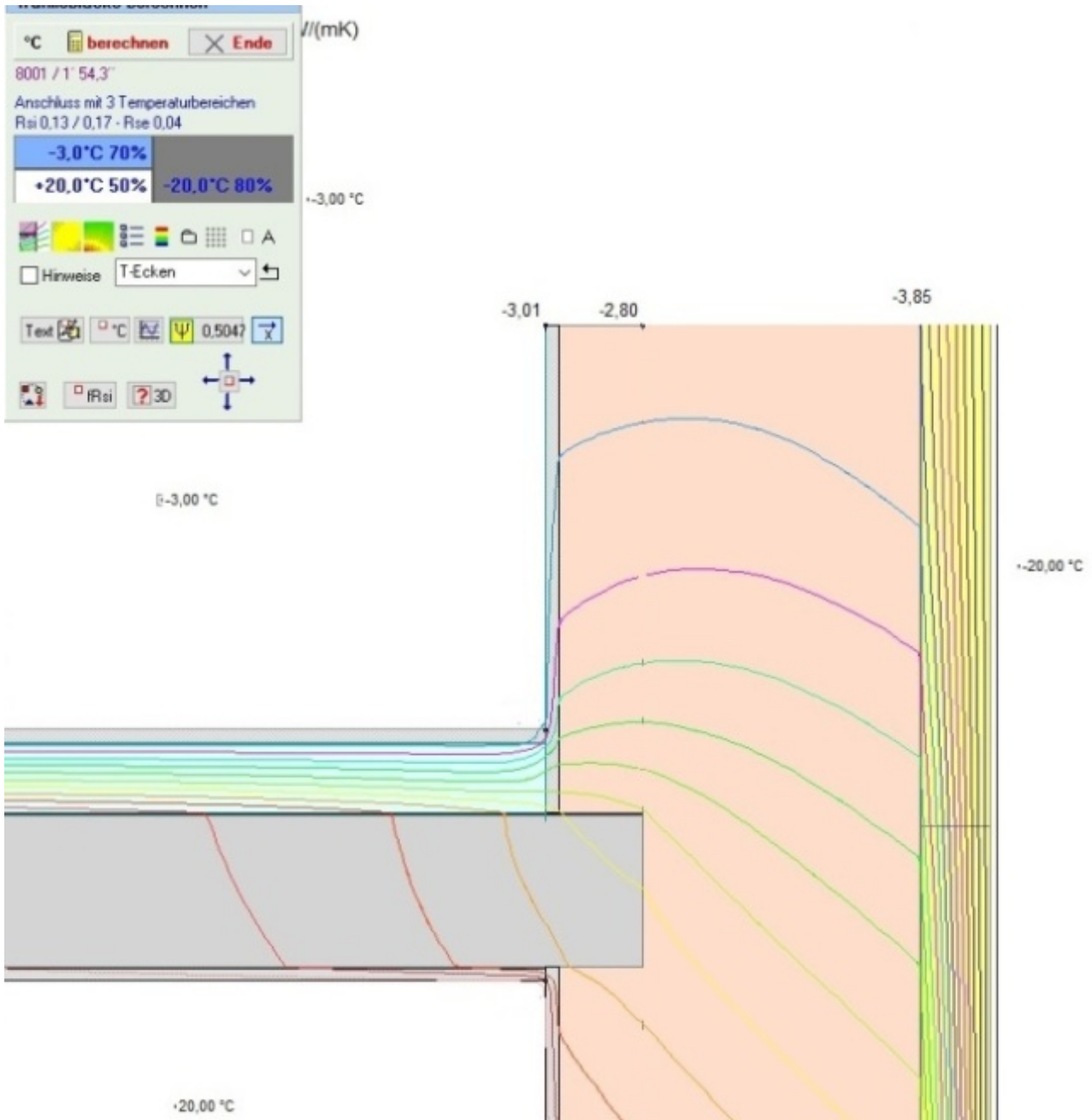


Рис. 4. Розподіл температури, °C, у вузлі примикання перекриття на технічному горіщі до зовнішніх огорожувальних конструкцій

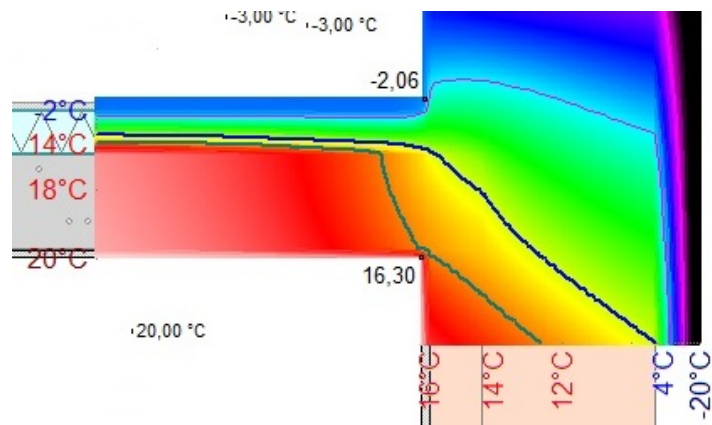


Рис. 5. Температурне поле вузла примикання перекриття на технічному горіщі

Вона варіюється від +20 °С до мінус 20 °С, чому відповідають кольори від червоного до чорного.

Найбільша температура, °С, спостерігається на внутрішній стороні зовнішньої стіни та плити перекриття (червоний колір). Потім, як видно з рис.5, колір змінюється на жовтий, зелений і блакитний, що пов'язано із зменшенням температури в середньому на 2 °С.

Найбільш різкий перепад температури спостерігається у місці приєднання плити горищного перекриття до зовнішньої стіни. Проте використання теплоізоляційної шпаклівки дозволяє зменшити тепловий потік у даній зоні.

З рис. 6 видно, що ізотерми розташовані паралельно одна одній та змінюють свій напрямок у вузлі примикання плити до зовнішньої стіни. Це вказує на неоднорідність конструкції в даному місці.

У приміщенні внутрішня температура поверхні в місці примикання плити перекриття до зовнішньої стіни становить 16,3 °С. На технічному горищі температура в місці примикання плити перекриття до зовнішньої стіни становить -2 °С. Температура на поверхні плити перекриття з боку горища становить 14 °С. Це вказує на правильність вибору товщини та

матеріалу утеплювача.

У програмному забезпеченні DAMWERK, за результатами моделювання теплового режиму, розраховано лінійний коефіцієнт теплопровідності для розробленого вузла примикання перекриття на технічному горищі. Він становить 0,229 Вт/м·К (рис. 6).

Значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі для даного вузла відсутнє в ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Це свідчить про необхідність удосконалення та доповнення нормативних документів сучасними вузлами примикання з утепленням.

**Висновки.** Результати моделювання розподілу температури у вузлі примикання перекриття технічного горища до зовнішньої теплоізоляційної оболонки будівлі та значення розрахованого лінійного коефіцієнта теплопередачі свідчать про те, що використання сучасних теплоізоляційних матеріалів при утепленні будинків дозволить підвищити їхню енергоефективність. Розраховане значення лінійного коефіцієнта теплопередачі становить 0,229 Вт/(м·К). Наявна нормативна база значень лінійних коефіцієнтів теплопередачі вузлів примикання не досконала і потребує доповнення.

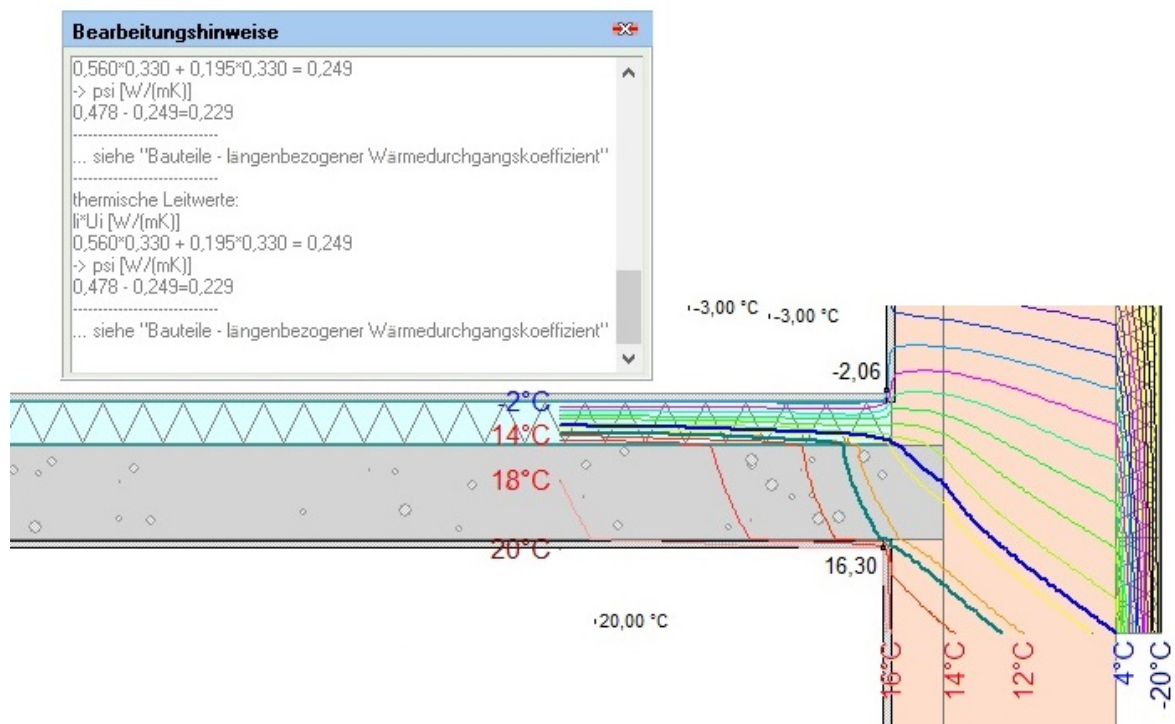


Рис. 6. Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі, Вт/(м·К), у вузлі примикання балконної плити до зовнішньої стіни в програмі DAMWERK



**Перспективи подальших досліджень.** На сьогодні не вирішено проблему стосовно достовірності врахування теплопровідності «теплових мостів». Конструктивні особливості будівель не в повній мірі враховуються у нормативних базах значень лінійних коефіцієнтів теплопровідності вузлів примикання. Тому подальше дослідження та розрахунок лінійних коефіцієнтів теплопередачі у вузлах

примикання огорожувальних конструкцій із використанням сучасних теплоізоляційних матеріалів залишається актуальним. Необхідно експериментально дослідити доцільність технологічних рішень реалізації запропонованого способу термомодернізації для підвищення ефективності виконання вузла примикання перекриття на технічному горіщі до зовнішніх огорожувальних конструкцій.

### Література

1. ДСТУ ISO 10211-2:2005. Теплопровідні вclusions в будівельних конструкціях. – Чинний від 01.03.2008. – Київ, Держспоживстандарт України, 2008. – 77 с.
2. Закон України “Про енергозбереження” із змінами. – Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 30, ст.283. – 1994.
3. Бещинська О. В. Оцінка якості теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій існуючих будівель / О. В. Бещинська, Г. С. Ратушняк // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. – 2006. – Вип. 9. – С. 107-111.
4. Ратушняк Г. С. Управління проектами енергозбереження шляхом термомодернізації будівель: навч. посіб. / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк. – Вінниця: Універ-Вінниця, 2006. – 120с.
5. Ратушняк Г. С. Підвищення енергоощадності багатоповерхових будинків шляхом вдосконалення вузлів примикання огорожувальних конструкцій / Г. С. Ратушняк, А. М. Очеретний, О. Ю. Материнська // *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. – 2017. – №2. – С. 113-119.
6. Ратушняк Г. С. Моделювання теплового режиму вузла примикання балконної плити з утепленням / Г. С. Ратушняк, О.Ю. Горюн // *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві* – 2019. – Т. 27. – № 2. – С. 199-203. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-199-203>
7. Зіменко С. В. Моделювання теплових втрат через огорожувальні конструкції складної форми : магістерська дис. : 144 Теплоенергетика / Зіменко Сергій Вікторович. – Київ, 2018. – 121 с.
8. Якусевич С. Г. Деякі аспекти ефективного влаштування теплоізоляційної оболонки будинку / С. Г. Якусевич, В. О. Плоский // *Energy-efficiency in civil engineering and architecture*. – 2017. – № 9. – С. 259-266.
9. Фаренюк Г. П. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій / Г. П. Фаренюк. – Київ: Гамма-принт, 2009. – 137с.
10. Xiaojun Li. Optimization of Insulation Thickness of External Walls of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone of China / Xiaojun Li, Xin Chen, Mehdi Shahrestani // *Sustainability*, 2020. – Vol. 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041574>
11. Довгалоук В. Б. Розвиток наукових основ створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.23.03 / Довгалоук В. Б. ; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2020. – 40 с.
12. Приймак О. В. Вплив конструктивних особливостей енергетичної палі на її ефективність / О. В. Приймак, П. О. Пасічник, І. Т. Кузицький // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. – 2018. – Вип. 25. – С. 31-36.
13. Semko O. Thermophysical aspects of reconstruction of cold roof spaces. / O. Semko, O. Yurin, Y. Avramenko, S. Skliarenko // *MATEC Web of Conferences* 116, 02030, 2017 <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711602030>
14. Возняк О. Т. Енергоощадні технології формування динамічного мікроклімату у стиснених умовах виробничих приміщень: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.23.03 / Возняк О. Т. ; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2018. – 36 с.
15. Пат. 139606 Україна : МПК E04B 1/76. Спосіб утеплення вузла примикання перекриття на технічному горіщі/ Г. С. Ратушняк, О. Ю. Горюн; № u201907036; заявл. 24.06.2019; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1/2020.

### References

1. *Teploprovodni vkluchennia v budivelnnykh konstruktciakh*. DSTU ISO 10211-2:2005. Derzhspozhyvstandart. Ukrainy, 2008.
2. Zakon Ukrainy “Pro enerhozberezhennia”. Vidomosti Verhovnoi Rady, 1994.
3. Beshchynska O. V., Ratushnyak G. S. “Ocinka yakosti teploizolyacijnih karakteristik ogorodhuvalnih konstrukeij isnuyuchih budivel”. *Ventylatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk* Vyp. 9. 2006. P. 107-111.
4. Ratushniak G. S. *Upravlinnia proektamy enerhozberezhennia shliakhom termorenovatsii budivel*. Univer-Vynnytsia, 2006.

5. Konstruktsii budynkiv i sporud. Teplova izoliatsiia budivel. DBN V.2.6-31-2016. Minrehion Ukrainy. 2017.
6. Ratushniak G. S., Goriun O.Yu. "Modeliuvannya teplovoho rezhimu vuzla prymykannia balkonnoi plyty z uteplyenniam". *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi*. 2019. T. 27. № 2. P. 199-203. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-199-203>
7. Zimenko S. V. *Modelyuvannya teplovi vtrat cherez ogorodzhivalni konstrukciyi skladnoyi formi : magisterska dis. : 144 Teploenergetika*. Kyiv, 2018.
8. Yakusevych S. H., Ploskyi V. O. "Deiaki aspekty efektyvnoho vlashtuvannia teploizoliatsiinoi obolonky budynku." *Energy-efficiency in civil engineering and architecture*. 2017. No 9. P. 259-266.
9. Farenjuk G. P. *Osnovy zabezpechennia enerhoefektivnosti budinkiv ta teplovoi nadijnosti ogorodzhivalnih konstrukcij*. Gamma-print, 2009.
10. Xiaojun Li, Xin Chen, Mehdi Shahrestani. "Optimization of Insulation Thickness of External Walls of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone of China." *Sustainability*, 2020. Vol. 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041574>
11. Dovhaliuk V. B. *Rozvitok naukovih osnov stvorennia temperaturno-vologisnih rezhimiv povitryanogo seredovisha v muzejnih primishennyah*. Diss. abstract. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2020.
12. Pryimak O. V., Pasichnyk P. O., Kuzyskyi I. T. "Vplyv konstruktyvnykh osoblyvosti enerhetychnoi pali na yii efektyvnist". *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia*, 2018. Vyp. 25. P. 31-36.
13. Semko O., Yurin O., Avramenko Y., Skliarenko S. "Thermophysical aspects of reconstruction of cold roof spaces". MATEC Web of Conferences 116, 02030, 2017 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602030>
14. Vozniak O. T. *Enerhooshchadni tekhnologii formuvannia dynamichnoho mikroklimatu u stysnennykh umovakh vyrobnychyykh prymishchen*. Diss. abstract. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2018.
15. Ratushnyak G. S., Goryun O. Yu. "Sposib uteplyennia vuzla prymykannia perekryttia na tekhnichnomu goryshchi". Patent of Ukraine 139606. 10.01.2020

## УДК 69.03

### Моделирование теплопередачи в узле примыкания чердачного перекрытия к наружным ограждающим конструкциям

Г. С. Ратушняк<sup>1</sup>, О. Ю. Горюн<sup>2</sup>, А. О. Лялюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., проф. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, [ratusnak@gmail.com](mailto:ratusnak@gmail.com), ORCID 0000-0001-9656-5150

<sup>2</sup> асп. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, [oksana2718@ukr.net](mailto:oksana2718@ukr.net), ORCID 0000-0002-3624-2293

<sup>3</sup> магистрант Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, [lyalyuk74@gmail.com](mailto:lyalyuk74@gmail.com), ORCID 0000-0002-4803-1629

**Аннотация.** Многочисленные исследования и тепловизионные обследования многоэтажных жилых домов, указывают на характерные места с повышенными теплопотерями. В домах, построенных с соблюдением современных отечественных нормативных требований по термическому сопротивлению ограждающих конструкций, фактическое термическое сопротивление стен и окон совпадает с нормативным. Однако, обнаружены узлы элементов наружных ограждающих конструкций с повышенными значениями теплопотерь. Утепление узлов примыкания позволяет увеличить термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций. С целью повышения энергоэффективности здания предложено конструктивное исполнение утепления узла примыкания перекрытия на техническом чердаке, защищённое патентом на полезную модель. Проанализированы линейные коэффициенты теплопередачи узла примыкания перекрытия на чердаке. Выявлено, что в нормативных документах не указано подобной информации. Уменьшение теплопотерь достигается за счёт устройства дополнительных слоёв утеплителя в виде аэрогелевой плиты в месте примыкания перекрытия к наружным ограждающим конструкциям. Анализ энергоэффективности предложенного конструктивного исполнения узла примыкания чердачного перекрытия как «мостика холода» выполнен по результатам математического моделирования в программном комплексе DAMWERK. По результатам моделирования установлено распределение температуры в узле примыкания перекрытия на техническом чердаке. Определён линейный коэффициент теплопередачи рекомендованного узла примыкания перекрытия на техническом чердаке, значение которого следует учитывать при проектировании зданий. Полученные результаты являются подтверждением целесообразности внедрения предложенного конструктивного исполнения узла примыкания перекрытия на техническом чердаке, что позволит повысить энергоэффективность теплоизоляционной оболочки здания.

*Ключевые слова: термическое сопротивление, ограждающая конструкция, узел примыкания, перекрытия, чердак, энергосбережение, коэффициент теплопередачи.*

**UDC 69.03**

## **Simulation of heat transfer at the junction of the attic floor to the building envelope**

G. Ratushnyak<sup>1</sup>, O. Horiun<sup>2</sup>, A. Lialiuk

<sup>1</sup> Sc.D, professor Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, [ratusnak@gmail.com](mailto:ratusnak@gmail.com),  
ORCID 0000-0001-9656-5150

<sup>2</sup> Post-graduate student. Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, [oksana2718@ukr.net](mailto:oksana2718@ukr.net),  
ORCID 0000-0002-3624-2293

<sup>3</sup> Master student. Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, [lyalyuk74@gmail.com](mailto:lyalyuk74@gmail.com),  
ORCID 0000-0002-4803-1629

***Abstract.** Numerous studies and thermal imaging inspection of multi-storey residential buildings indicate characteristic places with increased heat loss. In houses built in accordance with modern domestic regulatory requirements for the thermal resistance of enclosing structures, the actual thermal resistance of walls and windows coincides with the standard. However, nodes of elements of external enclosing structures with increased values of heat loss were found. Insulation of the junction points allows increasing the thermal resistance of the external enclosing structures. In order to increase the energy efficiency of a building, the design of the insulation of the junction of the ceiling in the technical attic has been proposed, which is protected by a patent for a useful model. The linear heat transfer coefficients of the junction point of the ceiling in the attic are analyzed. It was revealed that such information was not indicated in the regulatory documents. Reducing heat loss is achieved by arranging additional layers of insulation in the form of aerogel slabs at the junction of the ceiling to the external enclosing structures. The analysis of the energy efficiency of the proposed design of the junction unit of the attic floor as a "cold bridge" was carried out according to the results of mathematical modeling in the DAMWERK software package. Based on the simulation results, the temperature distribution in the junction of the ceiling in the technical attic was established. The linear heat transfer coefficient of the recommended junction point of the ceiling in the technical attic has been determined, the value of which should be taken into account when developing the Energy Efficiency section. The results obtained confirm the feasibility of introducing the proposed structural design of the floor abutment unit in the technical attic, which will improve the energy efficiency of the building's thermal insulation envelope.*

*Keywords: thermal resistance, building envelope, junction node, floor, attic, energy-saving, U-factor*

Надійшла до редакції / Received 23.09.2020

УДК 681.396

## Високоточний ядерно-квадрупольно-резонансний термометр для аерогідродинамічних досліджень

Т. М. Ткаченко<sup>1</sup>, Ю. Г. Пількевич<sup>2</sup>, В. О. Мілейковський<sup>3</sup><sup>1</sup> д.т.н., професор. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951<sup>2</sup> здобувач. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, y.rozorinova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7618-0250<sup>3</sup> д.т.н., доцент. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, v\_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

**Анотація.** У гідроаеродинаміці є задачі, які вимагають підвищеної точності вимірювання температури. Прикладом є вимірювання надлишкової температури на периферії турбулентних струмин. Необмежене підвищення температури на осі струмини задля підвищення точності вимірювання недоцільне через неавтономність за часом Архімеда. Для цього можливо використати явище ядерного квадрупольного резонансу. Запропоновано прилад для точного вимірювання температури в діапазоні від 0 °С до +200 °С. З використанням пакету графічного програмування LabView побудовано віртуальну модель автоматичного термометра на основі ядерного квадрупольного резонансу. Датчик ядерного квадрупольного резонансу відстежує резонансну частоту поглинання термометричної речовини і передає сигнал на вхід надрегенерації. Показано, що для зменшення похибки вимірювання необхідно або використати ручний спосіб вимірювання частоти або регенеративний режим.

**Ключові слова:** графічне програмування, температура, ядерний квадрупольний резонанс.

**Вступ.** Наявні прилади для вимірювання температури забезпечують необхідну точність і надійність для більшості задач наукових, промислових досліджень, налаштування й експлуатації систем теплогазопостачання і вентиляції. Однак, існує клас задач, для яких похибка вимірювання температури  $\pm 0,2...0,3$  К є суттєвою. Однією з таких задач теоретичної гідроаеродинаміки є вимірювання розподілу температури на периферії турбулентних неізотермічних струмин. Тому виникає задача підвищення точності засобів вимірювання температури.

**Актуальність досліджень.** Підвищення точності аерогідродинамічних досліджень є актуальною задачею, пов'язаною з поглибленням теорії турбулентних течій. Поглиблені теорії дозволять підвищити достовірність методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналітичні методи розрахунку течій у системах формування мікроклімату і вентиляційних приміщеннях. Крім цього, підвищення точності температурних вимірювань може покращити якість і ефективність високотехнологічного виробництва в інших галузях техніки.

**Останні дослідження та публікації.** На сьогодні немає єдиної точки зору щодо швидкості повітря на межі струмини. За "старою теорією" [1] Г. Шліхтинга ця швидкість у вільній ізотермічній струмині дорівнює нулю. За "новою теорією" [2] М. Й. Грімтіліна вона приймається лише 5 % від осьової. За теорією А. Я. Ткачука [3] розрахункове значення швидкості на межі струмини дорівнює 1,03 %.

Турбулентні струмини в широкому діапазоні числа Рейнольдса автономні за ним. Тому вимірювання задля підвищення точності на периферії найбільш простих струмин можна виконувати при максимальних значеннях швидкості повітря на виході, м/с, за яких стисливість (число Маха) не має значущого впливу.

У роботі [1] застосовано значення швидкості до 100 м/с. Тоді основною проблемою стає не похибка замірів усередненого модуля швидкості, м/с, а точність вимірювання напрямку руху поблизу межі струмини. Це б дозволило більш точно визначити складову вздовж напрямку струмини.

Більші проблеми виникають при випробуванні зразків повітророзподільників промислового виробництва. У них не завжди можливо створити високу швидкість через необхідність завищеного тиску, Па. Наприклад, повітророзподільник має коефіцієнт місцевого опору лише  $\zeta = 3$ . При початковій швидкості  $v_0 = 50$  м/с та стандартній густині повітря  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> необхідний надлишковий (понад атмосферний) тиск [3, 4] перед повітророзподільним пристроєм  $\Delta p = \zeta \rho v_0^2 / 2 = 4500$  Па.

Конструкцію пристрою може бути не розраховано на такий тиск. Адже навіть для промислової вентиляції у відгалуженнях рекомендовано приймати швидкість не більше 6 м/с [3, 4]. При цьому тиск становитиме лише  $\Delta p = 64,8$  Па. Це в  $4500/64,8 = 69,4$  рази менше ніж попереднє значення.

Значно складніша ситуація спостерігається з вимірюванням надлишкової температури  $\Delta T$ ,

К, (понад температуру навколишнього середовища  $T_{\infty}$ , К). Відмінність температури в струмині  $T$ , К, від  $T_{\infty}$ , К, призводить до відповідної різниці густини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Гравітаційні сили можуть суттєво деформувати таку струмину відповідно до плинного критерію Архімеда [2]:

$$Ar_x = \frac{g x \Delta T_m}{v_m^2 T_{\infty}}, \quad (1)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $x$  – шлях струмини від випуску до розрахункового перерізу, м;  $\Delta T_m$  – надлишкова температура на осі струмини в розрахунковому перерізі, К;  $v_m$  – відповідна швидкість повітря,  $\text{м}/\text{с}$ .

Турбулентні повітряні струмини автомобільні за числом Архімеда в дуже вузькій області [2]:

- для компактних струмин  $Ar_x = 0 \dots 0,1$ ;
- для плоских струмин  $Ar_x = 0 \dots 0,15$ .

Якщо б можна було підвищити початкову швидкість повітря хоча б до  $50 \text{ м}/\text{с}$ , то для досягнення потрібного числа Архімеда (1) завжди можна було б підібрати пару значень  $(v_m, \Delta T_m)$ . Однак, у більшості повітророзподільників промислового виробництва це неможливо. Тому при дослідженнях масштаби швидкості та температури приходить приймати близькими до одиниці. Фактична похибка вимірювань надлишкової температури, К, на периферії струмини може досягати 10 % і більше при необхідній похибці наукових досліджень до 5 %.

Єдиною можливістю підвищення точності досліджень периферійної зони струминних течій є зменшення похибки вимірювання температури, К. При цьому важливими умовами є мала інерційність та малі розміри датчика. Остання умова забезпечує необхідну роздільну здатність результатів.

Високонадійний і точний метод температурних вимірювань може використати ядерний квадрупольний резонанс (ЯКР). Цей метод базується на взаємодії градієнта електричного поля кристалічної решітки й квадрупольного електричного моменту ядра, викликаного відхиленням розподілу заряду ядра від сферичної симетрії. Ця взаємодія обумовлює прецесію ядер, частота якої залежить від градієнта електричного поля решітки. Для різних речовин вона має значення від сотень кілогерц до гігагерц.

Градієнт електричного поля решітки залежить від температури. З підвищенням температури частота ЯКР знижується. Датчик ЯКР-

термометра є ампулою з речовиною, замкненою всередину котушки індуктивності в контурі генератора. При збігу частоти генератора з частотою ЯКР речовини відбувається поглинання енергії від генератора. Принципи побудови стабільних генераторних схем викладені в [5, 6].

Ефективною термометричною речовиною є гранульований хлорат калію  $\text{KClO}_3$ , що є одночасно осердям індуктивності в контурі генератора. Похибка вимірювання температури в межах  $273,15 \dots 473,15 \text{ К}$  ( $0 \dots +200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) зменшується від  $\pm 0,02 \text{ К}$  до  $\pm 0,002 \text{ К}$  [7]. Позитивною якістю ЯКР-термометрів є їхня необмежена в часі стабільність, а недоліком – істотна нелінійність функції перетворення.

Останніми роками метод ЯКР знаходить все більше застосування в різній вимірювальній апаратурі. На основі цього методу виготовляються датчики температури, магнітного поля, тиску та ін. Мала абсолютна похибка вимірювання температури порядку  $10^{-3} \text{ К}$  робить їх незамінними при прецизійних вимірюваннях, а вихід інформації у вигляді частоти дуже зручний для створення автоматичних пристроїв.

**Мета статті.** Побудова й експериментальна перевірка автоматичного ЯКР-термометра у вказаних вище межах вимірювання з використанням технологій швидкого проектування, зокрема пакету графічного програмування LabView.

**Структурна схема.** Структурна схема ЯКР-термометра показана на рис. 1. Датчиком температури є надрегенеративний спектрометр з автоматичним стеженням за центром лінії поглинання, що складається з власне надрегенератора, смугового фільтра, компаратора, підсилювача постійного струму і генератора модуляційної напруги.

Схема, що здійснює перехід надрегенератора до режиму безперервної генерації і виведення інформації на індикацію містить:

- одновібратор;
- буферний каскад;
- мікроконтролер;
- індикатор.

Датчик температури автоматично стежить за резонансною частотою поглинання, що залежить від температури робочої речовини.

З виходу надрегенератора сигнал поглинання надходить на смуговий фільтр, а потім – на компаратор. Після компаратора напруга, що дорівнює різниці напруги входів, посилюється підсилювачем постійного струму. Цей сигнал через коло зворотного зв'язку керує системою стеження за резонансною частотою поглинання.

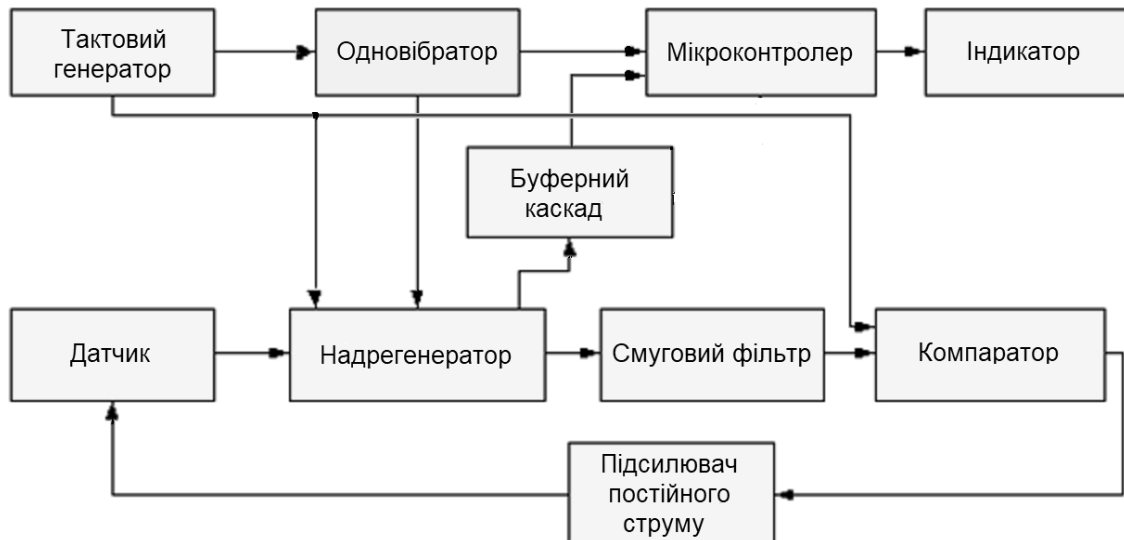


Рис. 1. Структурна схема ядерно-квадрупольно-резонансного термометра

Частота опитування датчика визначається одновібратором, коливання якого синхронізовано з тактовим генератором. Поки не надійде імпульс від одновібратора, працює генератор тактової частоти. При цьому відбувається налаштування надрегенерації на частоту ядерного квадрупольного резонансу.

При появі імпульсу від одновібратора робота тактового генератора зупиняється. Надрегенерація переводиться в режим безперервної генерації.

Сигнал від надрегенерації потрапляє на буферний каскад, що складається з емітерного повторювача й подільника частоти. Після цього сигнал надходить до мікроконтролера, де перераховується на температуру,  $K$ , і відображається на індикаторі.

Частота сигналу, що приймається (частота ЯКР)  $f_{\text{ЯКР}}$  лежить у діапазоні від 26 МГц до 28 МГц. Температура  $T$ , що відповідає максимальній і мінімальній частотам, дорівнює 293,15 К (20 °С) і 456,15 (183 °С).

Рівень сигналу, що приймається  $U_{\text{вих}}$  на частоті ЯКР, становить 0,5 мВ. Рівень шуму  $U_{\text{ш}}$  не більше 100 мкВ. Спектр термометричної речовини відповідає рис. 2.

Датчик ядерного квадрупольного резонансу відстежує резонансну частоту поглинання термометричної речовини й передає сигнал на вхід надрегенерації. Частота підстроювання датчика регулюється за допомогою варикапа. Ємність останнього змінюється залежно від сигналу, що надходить від підсилювача постійного струму. Датчик приєднується до колекторного кола надрегенерації.

При створенні принципової електричної схеми ЯКР-термометра слід правильно розрахувати ємності і вибрати варикап для підстроювання датчика на резонансну частоту [8, 9].

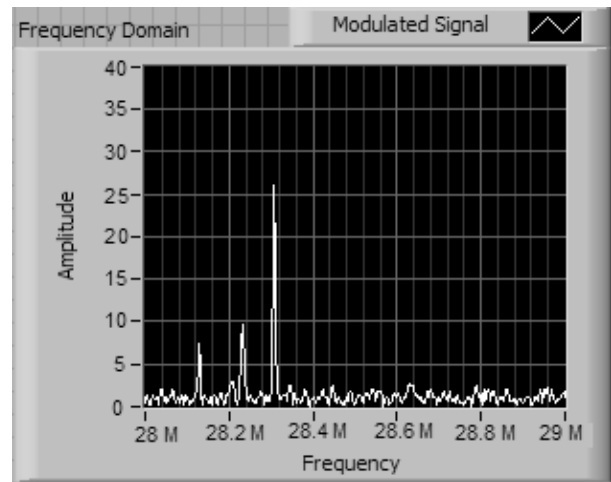


Рис. 2. Спектр  $KClO_3$

Варикап повинен мати діапазон зміни ємності не менше 10 пФ. Його зворотна напруга при максимальному значенні ємності не повинна перевищувати напругу живлення (наприклад, 12 В). Цим умовам задовольняє, наприклад, варикап типу ВВ405В.

Коли на вхід надрегенерації надходить імпульс тактового генератора, на його виході формується сплеск амплітудно-модульованих коливань. Частота появи сплесків визначається частотою тактового генератора.

Надрегенерація є регенерацією, у якої еквівалентне загасання контура повільно змінюється порівняно з власними коливаннями. При цьому на деяких інтервалах часу воно стає негативним. Тоді регенерація переходить в режим самозбудження.

Зазвичай еквівалентне загасання змінюється з допоміжною частотою – частотою суперізації. Вона в кілька разів вище за максимальну частоту модуляції і значно менше частоти сигналу і центральної частоти резонансного контура (приблизно у 500...1000 разів).

Надрегенератор може бути зібраний за класичною схемою на біполярному транзисторі. Еквівалентна добротність контура надрегенератора [8]

$$Q_E = \frac{\rho}{R_B + R_{\text{дод}} - K_{\text{ПЗЗ}} S \rho}, \quad (2)$$

де  $R_B$  – опір втрат у контурі, Ом;  $R_{\text{дод}}$  – додатковий опір контура, Ом,  $K_{\text{ПЗЗ}}$  – коефіцієнт передачі позитивного зворотного зв'язку;  $S$  – крутість характеристики транзистора в робочій точці, Ом<sup>-1</sup>;  $\rho$  – характеристичний опір контура датчика, Ом; останній член знаменника має розмірний коефіцієнт, рівний 1 Ом, який умовно не наведено.

Коли знаменник формули дорівнює нулю, крутість  $S$  набуває деякого критичного значення  $S_{\text{кл}}$ , Ом<sup>-1</sup>, і надрегенератор знаходиться на межі самозбудження. Тому знаменник формули еквівалентної добротності має бути більше нуля, щоб надрегенератор не знаходився на цій межі.

З виходу надрегенератора сигнал частоти поглинання поступає на смуговий фільтр, який виділяє його основну гармоніку. Як активний фільтр доцільно застосувати смуговий бікватратний фільтр другого порядку [10]. Далі сигнал проходить ланцюгом компаратор – підсилювач постійного струму – датчик.

**Моделювання автоматичного ЯКР-термометра.** У середовищі LabView містяться вбудовані шаблони, що називаються віртуальними приладами (ВП). Вони містять віртуа-

льні підприлади (ВПП), функції, структури й об'єкти лицьової панелі. Ці елементи необхідні при створенні базових конфігурацій для виконання різних вимірювань.

У схемі моделювання автоматичного ЯКР-термометра (рис. 3) надрегенератор є генератором частоти зразка, Гц. Ця частота далі буде конвертована в температуру, К.

Моделювання розпочинається з розміщення на блок-діаграму ВП Simulate Signal з привласненням йому назви "Надрегенератор". Далі встановлюються необхідні параметри генератора:

- Timing: Samples per second (Hz) – число точок в секунду, Гц, значення 1E+9;
- Frequency (Hz) – частота, Гц, значення 2,28 МГц;
- Reset Signal: Reset phase, seed, and time stamps – скидання сигналу в початковий стан (поодинокий сигнал).

На лицьову панель встановлюється термінал Vertical Pointer Slide – термінал введення величини. У даному випадку вводиться температура в кельвінах.

Позначимо властивості терміналу Vertical Pointer Slide:

- Appearance (зовнішній вигляд) – вводимо назву "Slide";
- Format and Precision (формат и точність) – встановлюємо формат введення значення floating-point (з точкою, що плаває);
- Scale (Шкала) – встановлюємо максимальне і мінімальне значення величин, що вводяться.

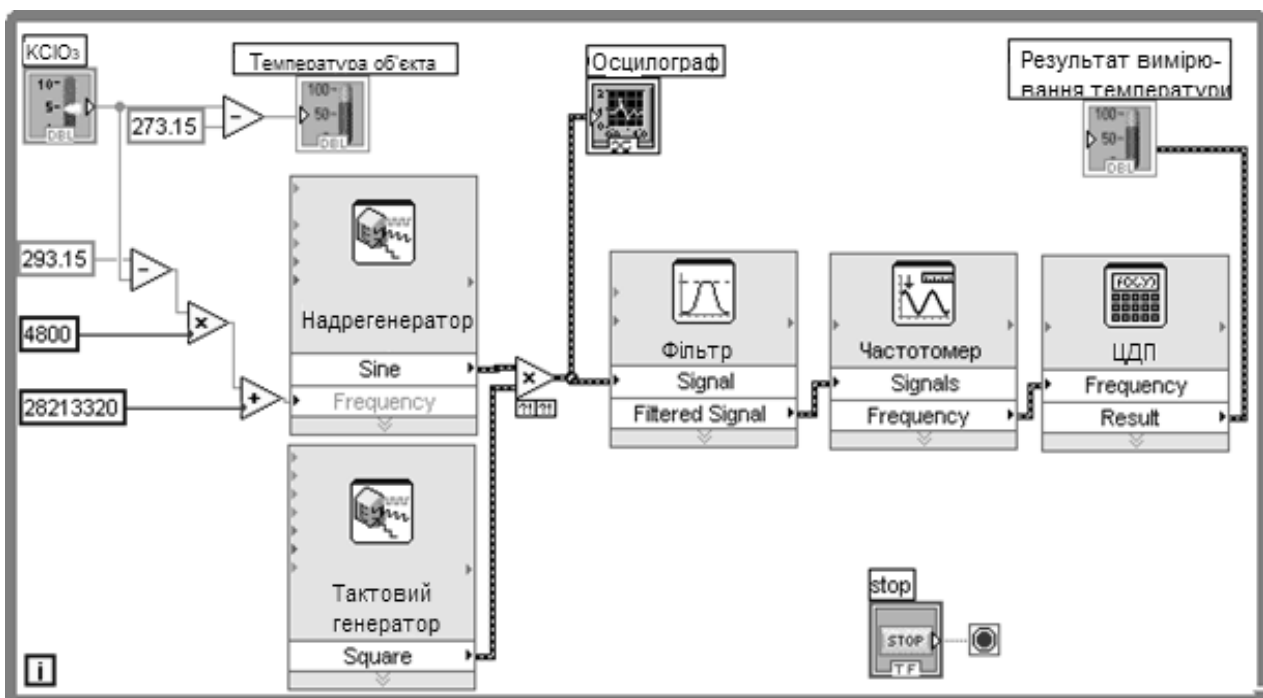


Рис. 3. Схема моделювання автоматичного ядерно-квадрупольно-резонансного термометра в середовищі LabView

Встановлюємо термінал Thermometer (Термометр). Цей термінал показуватиме температуру в градусах Цельсія. Для встановлення відповідності між градусами Цельсія і Кельвіна, використовується термінал Subtract (відняти), на вхід Y якого подається константа "273,15". Вихідний сигнал від терміналу Subtract поступає на термінал Thermometer.

Далі необхідно задати частоту надрегенерації. Відомо, що частота надрегенерації при температурі 293,15 К (20 °С) дорівнює 28213320 Гц. Кожен градус Кельвіна змінює її на 4800 Гц. За допомогою суматора і помножувача формується сигнал частоти надрегенерації. Додамо термінали Subtract, Add (суматор) і Multiply (помножити) на блок-діаграму для формування сигналу частоти.

На вхід X терміналу Subtract подається константа "293,15", а на вхід Y – сигнал від терміналу Vertical Pointer Slide. Вихід терміналу Subtract з'єднується з входом X терміналу Multiply, а на вхід Y подається константа "4800". Вихід терміналу Multiply з'єднується з входом X терміналу Add, а на вхід Y подається константа частоти при температурі 293,15 К, рівна 28213320 Гц. Вихід терміналу Add з'єднується з входом Frequency ВП Simulate Signal "Надрегенерація".

Додамо ще один ВП Simulate Signal з назвою "Генератор тактової частоти". Для того, щоб синхронізувати сигнали від надрегенерації і генератора тактової частоти, сполучаємо вихідний сигнал генератора тактової частоти з входом Reset Signal надрегенерації. При цьому, два сигнали матимуть однакові початкові фази. У пакеті прикладних програм LabView є вбудований ВП Tone Measurements (вимірювач тону), який має функції частотоміра, амплітудоміра і фазоміра. Після установки ВП Tone Measurements на блок-діаграмі з'являється вікно конфігурації. Якщо змінити параметр Amplitude (амплітуда) на параметр Frequency (частота) в області Signal

Tone Measurements, то ВП стає не амплітудоміром, а частотоміром.

**Результати випробування.** Випробування ЯКР-термометра показали, що метод ЯКР конкурує з іншими способами вимірювання температури. Він перевершує їх за абсолютною похибкою вимірювання. Проте підвищення точності вимірювання навіть на порядок за розробленою методикою нерационально, оскільки час рахунку при цьому збільшується також на порядок. Тому для зменшення похибки вимірювання необхідно або переходити на ручний спосіб вимірювання частоти, або надрегенерацію переводити в регенеративний режим. У останньому випадку вдається підвищити точність виміру до  $\pm 0,002$  градуса. При цьому доводиться застосовувати спеціальні заходи для усунення паразитної амплітудної модуляції. Тому автоматичний пристрій ускладниться. Основним недоліком цього методу є неможливість вимірювання температури вище 473,15 К (200 °С) із-за поганої чутливості регенерації. Звичайні ж надрегенерації в принципі не дозволяють робити прецизійні вимірювання з причини залежності центральної і бічних компонент спектру ЯКР від частоти гасіння. тому при використанні методу ЯКР для прецизійних вимірювань температури понад 473,15 К (200 °С) необхідно використати захоплений надрегенерацію.

#### Перспективи для подальших досліджень.

Попри те, що КСЮ<sub>3</sub> широко використовується в метрологічних цілях, його застосування в діапазоні температури вище 573,15 К (300 °С) ускладнено з огляду на те, що температура розкладання КСЮ<sub>3</sub> дорівнює 643,15 К (370 °С). Крім того, при використанні КСЮ<sub>3</sub> слід враховувати його токсичність і вибухонебезпечність.

Оскільки температурна залежність частоти ЯКР <sup>35</sup>СІ в КСЮ<sub>3</sub> нелінійна, має сенс досліджувати інші речовини, наприклад кристали закису міді Сu<sub>2</sub>О, які підвищують верхню межу температури аж до 873,15 К (600 °С).

#### Література

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – Москва: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2004. 337 с.
3. Довгалюк В. Б. Аеродинаміка вентиляції / В. Б. Довгалюк. – Київ: ІВНВКП «Укреліотех», 2015. – 366 с.
4. Juodis E. S. Vėdinimo aerodinamika / E. S. Juodis, V. Motuzienė. – Vilnius: Technika, 2014. – 296 p.
5. Карпенко В. Д. Современное состояние и перспективы ядерно-квадрупольной резонансной термометрии Украины / В. Д. Карпенко, Н. О. Ковальчук, А. М. Леновенко, С. Д. Солод, А. Г. Суворов // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. – Вып. 2(114) – С. 146–150.
6. Ларин В. Ю. Концепции профессионального проектирования приборов и систем: Книга 1 / В. Ю. Ларин, Г. Н. Розоринов, Н. И. Чичикало и др. – Київ: «Кафедра», 2016. – 468 с. ISBN 978-617-7301-07-2
7. Леновенко А. Вимірювальний комплекс для калібрування, перевірки й атестації засобів вимірювання температури на базі еталонного ядерно-квадрупольного термометра першого розряду ЯКРТ-5М / А. Леновенко,



Б. Стадник, П. Столярчук, В. Паракуда, Н. Ковальчук // Вимірювальна техніка та метрологія. 2013. – №74 – С. 127–132.

8. Харинский А. А. Основы конструирования элементов радиоаппаратуры. – Ленинград: Энергия, 1971. – 464 с.

9. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров / Р. Зааль. – Москва: Радио и связь, 1983. – 752 с.

10. Ohte A. Accurate calibration a precision of new NQR thermometer (203 K to 398 K Range Calibration at the NRML) / A. Ohte, H. Iwaoka // Metrologia. – 1979. – Vol. 15. – № 4. – p. 195–199.

#### References

1. Abramovych H. N. Teoriia turbulentnykh strui. Ekolit, 2011.

2. Grititlin M. I. Raspredeleniie vozduha v pomeshcheniiah. AVOK Severo-Zapad, 2004.

3. Dovhaliuk V. B. Aerodynamika ventyliatsii. IVNVKP «Ukrheliotekh», 2015.

4. E. S. Juodis, V. Motuzienė. Vėdinimo aerodinamika. Technika, 2014.

5. Larin V. Yu., Rozorinov H. N., Chichikalo N. I. Kontseptsii professionalnogo proektirovaniia priborov i sistem. Kniga 1. Kafedra, 2016.

6. Karpenko V. D., Kovalchuk N. O., Lenovenko A. M., Solod S. D., Suvorov A. H. “Sovremennoe sostoianie i perspektivy yaderno-kvadrupolnoi rezonansnoi termometrii Ukrainy”. Kosmicheskaiia tekhnika. Raketnoe vooruzhenie. 2017. no. 2(114). P. 146–150.

7. Lenovenko A., Stadnik B., Stolyarchuk P., Parakuda V., Kovalchuk N. “Vymiriuvalni kompleks dlia kalibruvaniia, perevirki i atestatsii zasobiv vymiriuvanniia temperatury na bazi etalonnoho yaderno-kvadrupolnoho termometra pershoho rozriadu YaKRT-5M”. Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. 2013. no.74 . P. 127–132.

8. Kharinskii A. A. Osnovy konstruirovaniia elementov radioaparatury. Enerhiia, 1971.

9. Zaal R. Spravochnik po raschetu filtrov. Radio i sviaz, 1983.

10. Ohte A.Iwaoka H. “Accurate calibration a precision of new NQR thermometer (203 K to 398 K Range Calibration at the NRML)”. Metrologia. 1979. Vol. 15. № 4. P. 195–199.

УДК 681.396

## Высокоточный ядерно-квадрупольно-резонансный термометр для гидроаэродинамических исследований

Т. М. Ткаченко<sup>1</sup>, Ю. Г. Пилькевич<sup>2</sup>, В. О. Милейковский

<sup>1</sup> д.т.н., профессор. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>2</sup> соискатель. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, [y.rozorinova@gmail.com](mailto:y.rozorinova@gmail.com), ORCID: 0000-0002-7618-0250

<sup>1</sup> д.т.н., доцент. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, [v\\_mil@ukr.net](mailto:v_mil@ukr.net), ORCID: 0000-0001-8543-1800

*Аннотация.* В аэрогидродинамике существуют задачи, которые требуют точности измерения температуры. Примером является измерение избыточной температуры на периферии турбулентных струй. Неограниченное повышение температуры на оси струи для повышения точности измерения нецелесообразно из-за неавтомодельности по числу Архимеда. Для этого можно использовать явление ядерного квадрупольного резонанса. Предложено устройство для точного измерения температуры в диапазоне от 0 °С до + 200 °С. С использованием пакета графического программирования LabView построена виртуальная модель автоматического термометра на основе ядерного квадрупольного резонанса. Датчик ядерного квадрупольного резонанса отслеживает резонансную частоту поглощения термометрического вещества и передаёт сигнал на вход сверхрегенератора. Показано, что для уменьшения погрешности измерения необходимо либо использовать ручной способ измерения частоты или регенеративный режим.

*Ключевые слова:* графическое программирование, температура, ядерный квадрупольный резонанс.

UDK 681.396

## High-precision nuclear-quadrupole-resonance thermometer for hydroaerodynamic research

T. Tkachenko<sup>1</sup>, Yu. Pilkevych<sup>2</sup>

<sup>1</sup> doctor of technical sciences, prof., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>2</sup> competitor, Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, [y.rozorinova@gmail.com](mailto:y.rozorinova@gmail.com), ORCID: 0000-0002-7618-0250

<sup>3</sup> doctor of technical sciences, assoc. prof., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

*Abstract. In hydroaerodynamics, there are problems that require increased accuracy of temperature measurement. An example is the measurement of excess temperature at the periphery of turbulent jets. Unlimited temperature increase on the axis of the jet to increase the accuracy of measurement is impractical due to non-automodeliness by the Archimedes number. To do this, it is possible to use the phenomenon of nuclear quadrupole resonance. The device for exact measurement of temperature in the range from 0° C to +200 °C is offered. Using the LabView graphic programming package, a virtual model of an automatic thermometer based on nuclear quadrupole resonance in KClO<sub>3</sub> was built. The temperature sensor is a superregenerative spectrometer with automatic monitoring of the center of the absorption line of the thermometric substance, consisting of the actual superregenerator, bandpass filter, comparator, DC amplifier and modulating voltage generator. The circuit that switches the supergenerator to the mode of continuous generation and output of information on the display contains a single vibrator, a buffer stage, a microcontroller and an indicator. From the output of the superregenerator, the absorption signal is fed to the bandpass filter, and then to the comparator. After the comparator, a voltage equal to the input voltage difference is amplified by a DC amplifier. This signal controls the resonant absorption frequency through the feedback circuit. The frequency of the sensor polling is determined by a single vibrator, the oscillations of which are synchronized with the clock generator. Measuring uncertainty in the range above changes from 0.02 K to 0.002 K. It has been shown that either a manual frequency measurement method or a regenerative mode must be used to reduce the measurement uncertainty up to 0.002 K in the range. This improved automatic device is more complex, because of requirements of special measures to eliminate parasitic amplitude modulation. To increase the temperature range and precision, it is possible to find other thermometric substance, such as Cu<sub>2</sub>O crystals.*

*Keywords: graphic programming, temperature, nuclear quadrupole resonance.*

Надійшла до редакції / Received 22.11.2020

УДК 697.97

## Чисельне моделювання параметрів повітряно-ґрунтових теплообмінників для геотермальної вентиляції

О. М. Недбайло<sup>1</sup>, І. К. Божко<sup>2</sup>, М. В. Ткаченко<sup>3</sup>, С. В. Андрейчук<sup>4</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, [nan\\_sashulya@ukr.net](mailto:nan_sashulya@ukr.net), ORCID: 0000-0003-1416-9651

<sup>2</sup>к.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, [bozhkoik@gmail.com](mailto:bozhkoik@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7458-0835

<sup>3</sup>к.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, [tkamyr@gmail.com](mailto:tkamyr@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8345-1613

<sup>4</sup>м.н.с. Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, [sva011966@gmail.com](mailto:sva011966@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2507-0051

*Анотація. Метою даної роботи є розробка чисельної моделі цілорічної роботи теплообмінника "земля-повітря" з круглою формою перерізу з подальшим підтвердженням на основі отриманих експериментальних даних. Ці дослідження мають стати основою для розробки методів розрахунку та проектування геотермальних систем вентиляції для кліматичних умов України. Розрахунки виконувалися на основі системи рівнянь, що характеризує процеси аеродинаміки та теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику: збереження імпульсу, збереження енергії, кінетичної енергії турбулентності, швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності. Для проведення експериментальних досліджень роботи системи геотермальної вентиляції в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України було створено експериментальний стенд. Результати експериментальних досліджень було використано для перевірки чисельної моделі. Показано, що при слабкій зміні середньодобової температури зовнішнього повітря розбіжність результатів не перевищує похибки експериментальних досліджень.*

*Ключові слова: геотермальна вентиляція, повітряно-ґрунтовий теплообмінник, експериментальні дослідження, математичне моделювання, відновлювані джерела енергії.*

**Вступ.** Для комфортного перебування людей у будівлях важливою умовою є надходження до приміщень зовнішнього повітря, яке відповідає санітарно-гігієнічним нормам. Його нагрів (охолодження) і подача забезпечуються системою вентиляції. Вентиляція виконує функцію повітрообміну в приміщенні для видалення надлишків теплоти, вологи, вуглекислоти та інших шкідливих і забруднювальних речовин з метою забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та якості повітря в зоні перебування людини. Дотримання нормативного повітрообміну в житлових та адміністративно-побутових приміщеннях, визначеного державними будівельними нормами України, є обов'язковим при новому будівництві чи реконструкції наявних будівель.

**Актуальність роботи.** Підвищення нормативних вимог до енергоефективності будівель ускладнює розроблення систем вентиляції у зв'язку зі значними цілорічними енерговитратами на нагрівання та охолодження припливного повітря.

Одним із варіантів вирішення проблеми зменшення енергоспоживання є використання системи геотермальної вентиляції. Завдяки ній можна зменшити різницю температури повітря,  $K$ , між входом до вентиляційної установки і подачею до приміщення. Це дозволяє знизити витрати енергії на нагрівання або охолодження у вентиляційній установці.

**Останні дослідження та публікації.** Основним елементом системи геотермальної

вентиляції є повітряно-ґрунтовий теплообмінник, що знаходиться в ґрунтовому масиві на певній глибині – від 1 до 5 м. Ця глибина залежить від кліматичних умов конкретної місцевості.

Повітряно-ґрунтовий теплообмінник зазвичай має канали круглої або прямокутної форми поперечного перерізу та різної довжини. Основні конструкції типових повітряно-ґрунтових теплообмінників наведені в роботах [1, 2].

Теплотехнічні параметри й експлуатація теплообмінників зазначеного типу вже достатньо давно досліджуються у всьому світі. Так наприклад, проведено дослідження в Європі [3, 4, 5, 6], Африці [7, 8, 9], Азії [10, 11] та Америці [12]. В Україні також ведуться роботи в цьому напрямку [13, 14]. Проте їхніх результатів недостатньо для розроблення методики розрахунку та проектування систем геотермальної вентиляції для відповідних умов клімату та ґрунтів.

Активний розвиток систем геотермальної вентиляції спричиняє потребу проведення теоретичних досліджень. Це дозволяє поглибити розуміння процесів, що відбуваються в повітряно-ґрунтових теплообмінниках, та визначити кількісний вплив різних параметрів на економічну ефективність такої системи. Розгляд цих факторів разом або поодиноці є складною задачею, що стоїть перед сучасними дослідниками.

Останнім часом в інформаційних джерелах

опубліковано декілька досліджень роботи повітряно-грунтових теплообмінників методом числового моделювання. Аналіз ефективності таких теплообмінників зазвичай містить розрахунок теплопровідності масиву ґрунту до стінки теплообмінника або розрахунок параметрів конвективного теплообміну між повітрям у теплообміннику та ґрунтовим масивом.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної роботи є розробка чисельної моделі цілорічної роботи теплообмінника "земля-повітря" з круглою формою перерізу з подальшим підтвердженням на основі отриманих експериментальних даних.

**Основна частина.** Для розв'язання завдань ґрунтового акумулювання і вилучення теплоти необхідно знати глибину річних змін температури в ґрунті  $H$ , м. Її визначає шар ґрунту, який реагує на зміну температури атмосфери Землі. Нижче цієї глибини температурний режим ґрунтового масиву стабільний і визначається винятково геологічними процесами.

Як показано в [13], значення  $H$  може змінюватися від 3,9 м до 5,0 м. Температура ґрунтового масиву нижче цієї глибини може бути 278,15...282,15 К (5...9 °С), залежно від регіону України.

У даній роботі для дослідження течії повітря в трубі, яка розташована в масиві ґрунту, уведено припущення:

- усі матеріали ізотропні та гомогенні;
- температура ґрунту, К, залежить від глибини за [13].

Розрахунки виконувалися на основі системи рівнянь, що характеризує процеси аеродинаміки та теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику:

- збереження імпульсу;
- збереження енергії;
- кінетичної енергії турбулентності;
- швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності.

Основні рівняння розв'язувалися за допомогою методу кінцевих об'ємів. У більшості областей розрахункова сітка мала елементи у формі призми. Рівняння Нав'є-Стокса розв'язувалися з першим порядком точності. Теплофізичні властивості матеріалів залежно від температури, °С, було прийнято за довідковими даними.

При виконанні розрахунків в моделі використовувалися граничні умови:

- на поверхні ґрунтового масиву, що контактує з навколишнім середовищем, задавалися граничні умови третього роду – коефіцієнт тепловіддачі 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К) та

температура, К, що дорівнювала значенню такої для повітря на вході до повітряно-ґрунтового теплообмінника;

- з боків ґрунтового масиву, обмежених розрахунковою областю, задавалися температура ґрунту залежно від глибини  $z$ , м, та пори року:
  - у квітні

$$T(z) = 0,16 z^3 + 0,6899 z^2 + 0,343 z + 277,24, \text{ К}; \quad (1)$$

- у липні

$$T(z) = 0,431 z^2 + 2,685 z + 287,3, \text{ К}; \quad (2)$$

- у жовтні

$$T(z) = -0,54392 z^2 + 2,4523 z + 277,54, \text{ К}; \quad (3)$$

- на нижній межі області температура ґрунту  $T_s$  прийнята постійною і становила [13]:
  - квітень – 277,15 К (4 °С);
  - липень – 286,15 К (13,0 °С);
  - жовтень – 283,65 К (10,5 °С);
  - січень – 277,90 К (4,75 °С);
- на вході до повітряно-ґрунтового теплообмінника було задано
  - температуру повітря  $T$ , К;
  - швидкість повітря,  $v$ , м/с;
  - інтенсивність турбулентності 10 %;
  - гідравлічний діаметр, що відповідав внутрішньому діаметру трубопроводу, м.

Розрахункова область (рис. 1) мала вигляд прямокутного паралелепіпеда із розмірами 22×4,0×4,21 м (довжина × ширина × висота).

Розрахункову область було розбито на комірки за допомогою пірамідальної сітки з різним згущенням до повітряно-ґрунтового теплообмінника. Було обрано три варіанти сітки з різним розміром розрахункових комірок.

За результатами порівняння (рис. 2) для подальших розрахунків обрано сітку з 1 млн. комірок. Адже різниця між результатами розрахунків за обраною сіткою та сіткою з 4,35 млн. комірок становить менше ніж 0,5 К. Це відповідає похибці вимірювання при експериментальних дослідженнях. Більш груба сітка дає значно більше відхилення.

Для проведення експериментальних досліджень роботи системи геотермальної вентиляції в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України створено науково-технічну та технологічну теплофізичну лабораторію.

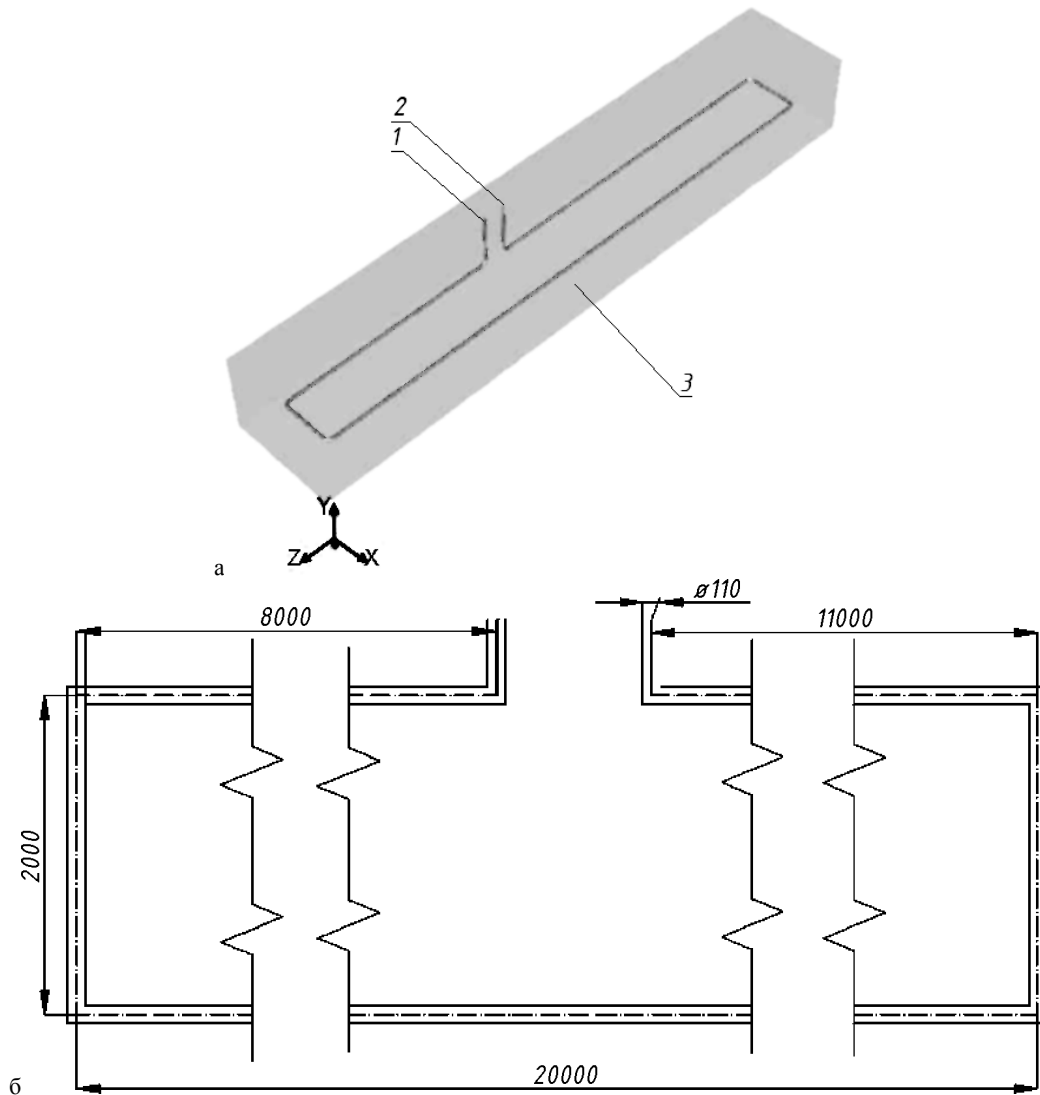


Рис. 1. Схема розрахункової області та геометричні розміри теплообмінника:

а – загальний вигляд; б – план теплообмінника:

1 – вхід до повітряно-грунтового теплообмінника; 2 – вихід з теплообмінника; 3 – масив ґрунту

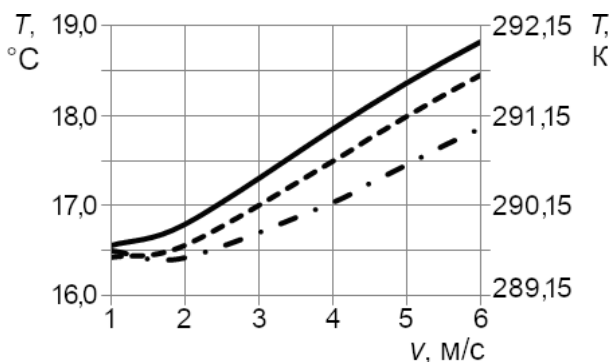


Рис. 2. Порівняння результатів розрахунку

для різної кількості комірок сітки:

— 4 350 тис. Комірок; - - - 1 000 тис. комірок;  
- · - · 400 тис. комірок

Ця лабораторія призначена для дослідження теплофізичних процесів при експлуатації геотермальної системи вентиляції. У ній змонтовано експериментальний стенд. Основним його елементом є повітряно-ґрунтовий теплообмінник кільцеподібної форми загальною протяжністю 43 м.

Теплообмінник виготовлено з труб з непластифікованого полівінілхлориду (НПВХ)  $\varnothing 110$  мм що знаходяться в ґрунтовому масиві на глибині 2,2 м. Ця глибина нижче сезонної глибини промерзання ґрунту в м. Києві. Даний теплообмінник експлуатується у двох режимах:

- у теплий період року – режим охолодження повітря;
- у холодний період – режим нагріву повітря.

Дослідження роботи системи геотермальної вентиляції проведено у двох гідродинамічних режимах. Припливне повітря прокачувалося в теплообміннику зі швидкістю  $v$ , рівною 4,4 м/с та 5,5 м/с в ядрі потоку. Це відповідає об'ємній витраті повітря 29  $\text{дм}^3/\text{с}$  та 37  $\text{дм}^3/\text{с}$ .

Експериментальний стенд оснащений вимірювальною системою:

- термоелектроанемометром Testo 405-V1;
- 32-ма напівпровідниковими датчиками ВМЕ 280 у ґрунтовому масиві поблизу теплообмінника;

- вторинними приладами на основі мікропроцесорів.

Основні параметри, що реєструються вимірювальним комплексом на вході і виході з теплообмінника та можуть свідчити про ефективність роботи теплообмінника:

- температура повітря, К;
- відносна вологість повітря, К;
- тиск повітря, Па.

Отримані на експериментальному стенді дані дозволили валідувати модель. Порівнювалися дані повномасштабного експерименту з даними математичного моделювання за умови розв'язання стаціонарної задачі руху повітря в повітряно-грунтового теплообмінника при різних значеннях середньодобової температури повітря, К, на вході.

При виконанні валідаційних розрахунків як граничні умови на боковій поверхні масиву ґрунту задавалися значення температури ґрунту, К, у квітні та жовтні за формулами (1) і (3). На верхній поверхні задавалися граничні умови третього роду з температурою, що дорівнювала температурі повітря на вході до теплообмінника, К.

Як видно з результатів моделювання (рис. 3), частина експериментальних даних збігається з розрахунком у межах точності експериментів. Деякі точки лежать вище розрахункової кривої. Це пояснюється стаціонарною постановкою задачі розрахунку. При цьому не враховано накопичення теплоти в ґрунті при

зміні температурного режиму.

Якщо середньодобова температура протягом попередніх діб перед добою вимірювання перевищувала на декілька градусів останню, то теплова енергія накопичувалась у масиві ґрунту навколо труби повітряно-грунтового теплообмінника. Це спричиняло більш високе значення температури на виході з теплообмінника. Зазначена нестационарність процесу не була врахована в моделі, яка була використана в даному випадку. Але в цілому за відсутності різкої зміни погодних умов модель прогнозує температуру на виході з повітряно-грунтового теплообмінника з точністю експериментально-го вимірювання.

Для отриманих даних визначено середнє відносне відхилення розрахункової температури на виході з теплообмінника  $T_{вих,р}$ , К, від дослідного значення  $T_{вих,д}$ , К, за формулою

$$\sigma = \frac{T_{вих,д} - T_{вих(розрахунок)}}{T_{вих(експеримент)}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

Результати розрахунку розподілу відносної похибки (рис. 4) температури, вираженої у кельвінах, показали, що вона варіюється в діапазоні від -0,25 до 1,25 %. Більшість даних для жовтня 2018 року (28 %) має відносну похибку в межах 0,25...0,5 % (рис. 4а).

Для квітня 2018 року діапазон відносної похибки варіювався від мінус 1 до 1 %.

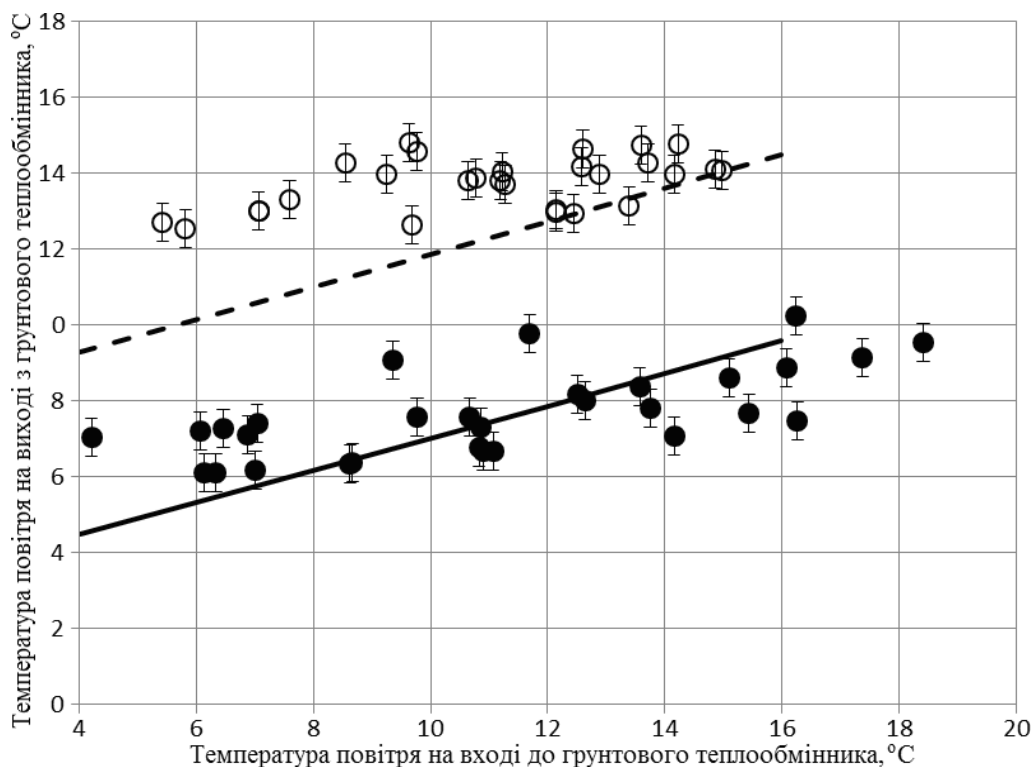


Рис. 3. Валідація теплофізичного моделювання за допомогою експериментальних даних:

— — розрахунок (квітень); • - дослідні дані (квітень); - - - - розрахунок (жовтень); ○ - дослідні дані (жовтень)

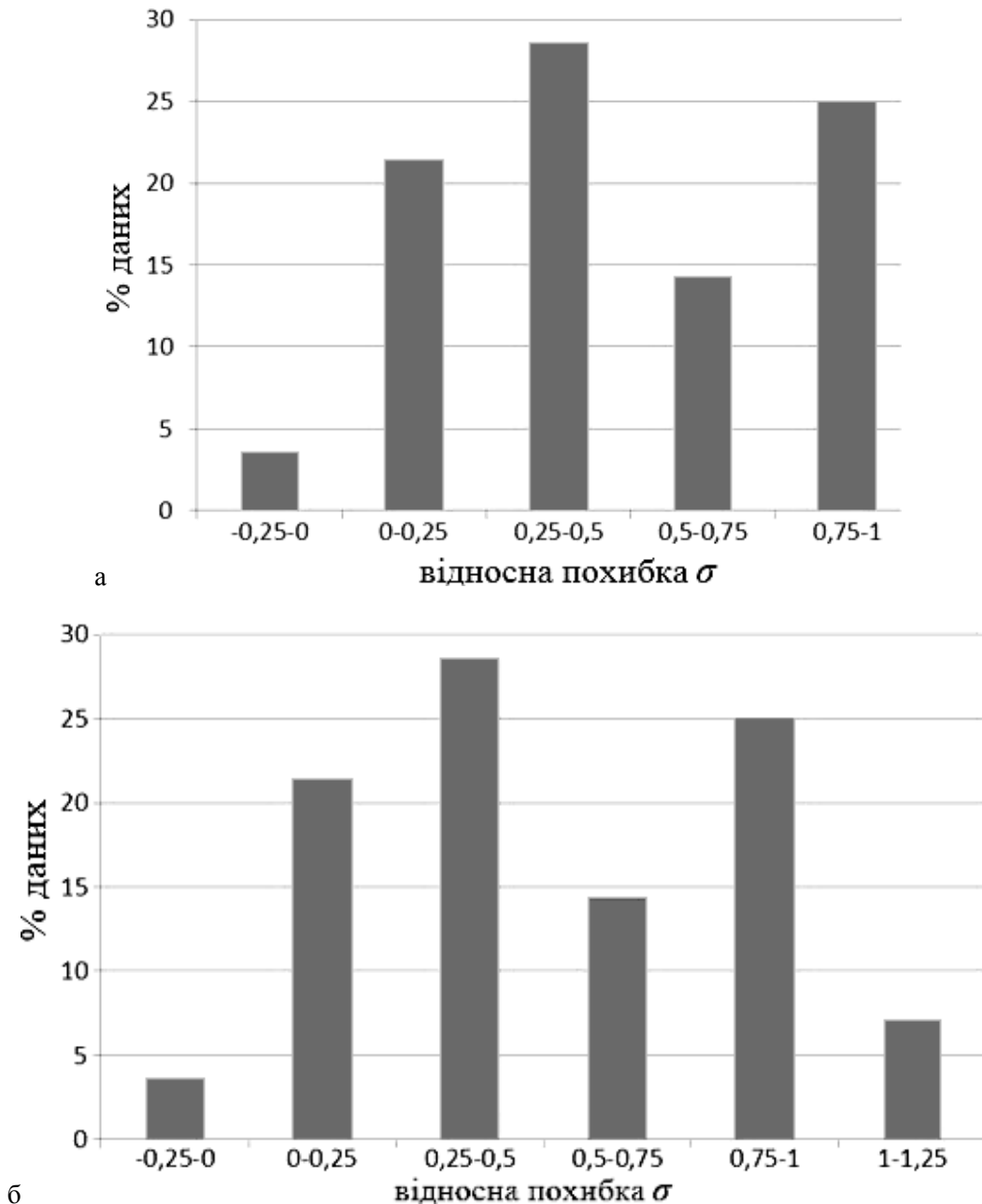


Рис. 4. Діапазон розподілу відносної похибки за формулою (4):  
а – у жовтні; б – у квітні

Більшість даних (40 %) для квітня (рис. 4б), має відносну похибку від 0 до -0,5 %.

**Висновки.** Підвищення енергоефективності будівель за рахунок систем геотермальної вентиляції є актуальним напрямком досліджень. У загальному розумінні на ефективність теплообміну в повітряно - ґрунтових теплообмінниках можуть впливати такі фактори, як глибина розміщення теплообмінника, його геометричні розміри і конструкція, значення температури ґрунту і повітря, теплофізичні

властивості ґрунту і матеріалу, з якого виготовлено теплообмінник, витрата повітря в системі, кліматичні особливості місцевості тощо. Запропонована теплофізична модель адекватно описує процеси аеродинаміки та теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику.

**Перспективи подальших досліджень.** На основі розробленої математичної моделі розглядається можливість розрахунку та оптимізації основних теплотехнічних параметрів ґрунтових теплообмінників.

### Література

1. Tzaferis A. Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers / A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris, A. Argiriou // *Energy and Buildings*. – 1992. – Vol. 18. – P. 35 - 43.
2. Amar Rouag, Adel Benchabane, Charaf-Eddine Mehdid. Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I. A new transient semi-analytical model for determining soil temperature / Amar Rouag, Adel Benchabane, Charaf-Eddine Mehdid // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – №182. – P. 538-544. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.089.
3. Badescu V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house / V. Badescu // *Renew Energy*. – 2007. – No. 32. – P. 845 – 855.
4. Benkert S. Calculation tool for earth heat exchangers GAEA / S. Benkert, F. Heidt, D. Scholer // *Proceeding of building simulation Fifth International IBPSA Conference. Prague*. – 1997. – Vol. 2. – P. 9-16.
5. Филатов С. О. Эффективность использования энергетических свай с теплоносителем воздух в системах вентиляции и теплоснабжения / С. О. Филатов, В. И. Володин // *Промышленная теплотехника*. – 2013. – Т. 35. – № 3. – С. 44 - 50.
6. Басок Б. І. Теплофізичне моделювання повітряно-грунтового теплообмінника для теплової зв'язки фасадних стін експериментального енергоефективного будинку / Б. І. Басок, М. П. Новіцька // *Промышленная теплотехника*. – 2017. – Т.39. – № 1. – С. 35 - 38.
7. Sehli A. The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria / A. Sehli, A. Hasni, M. Tamali // *Energy Procedia*. – 2012. – no 18. – P. 496-506.
8. Amara S. Using Fougara for Heating and Cooling Buildings in Sahara / S. Amara, B. Nordell, B. Benyoucef // *Energy Procedia*. – 2011. – no 6. – P. 55-64.
9. Congendo P. Experimental validation of horizontal air-ground heat exchangers (HAGHE) for ventilation systems / P. Congendo, C. Lorusso, C. Baglivo, M. Milanese, L. Raimondo // *Geothermics*. – 2019. – Vol. 80. – P. 78-85. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.02.010
10. Sanusi Aliyah NurZafirah. Low Energy Ground Cooling System for Buildings in Hot and Humid Malaysia. PhD thesis, 2012 / Sanusi Aliyah Nur Zafirah. De Montfort University. – 2012. – 271 p.
11. Noor Aziah Mohd. Materials for the earth air pipe heat exchanger system as a passive ground cooling technology for hot humid climate / Noor Aziah Mohd. Ariffin, Aliyah Nur Zafirah Sanusi, Aminuddin Mohd Noor // *Materials of nd International Conference on Emerging Trends in Scientific Research 2014 Pearl International Hotel, Kuala Lumpur 2nd & 3rd November 2014*. – P. 1-12. URL: [http://irep.iium.edu.my/39826/5/2nd-ICETSR2014\\_NoorAziah\\_EAPHE\\_\(2\).pdf](http://irep.iium.edu.my/39826/5/2nd-ICETSR2014_NoorAziah_EAPHE_(2).pdf)
12. Krarti. M. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel / M. Krarti, J. Kreider // *Energy Conversion and Management*. – 1996. – Vol. 37. – No. 10. – P. 1561 - 1574.
13. Накорчевский А. И. Регрессионный анализ глубин годовых флуктуаций температур в верхних слоях грунта / А. И. Накорчевский, Т. Г. Беляева // *Промышленная теплотехника*. – 2005. – Т. 27. – № 6. – С. 86 - 90.
14. Басок Б. И. Динамика теплообмена жидкости в грунтовом прямолинейном одиночном элементе (теплообменнике) / Б. И. Басок, А. А. Авраменко, С. С. Рыжков, А. А. Лунина // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – Т. 31. – №1. – С. 62 - 67.

### References

1. Tzaferis A., Liparakis D., Santamouris M., Argiriou A. “Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers”. *Energy and Buildings*. 1992. Vol. 18. P. 35-43.
2. Amar Rouag, Adel Benchabane, Charaf-Eddine Mehdid. “Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I. A new transient semi-analytical model for determining soil temperature”. *Journal of Cleaner Production*. 2018. №182. (2018). . 538-544. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.089.
3. Badescu V. “Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house”. *Renew Energy*, 2007. No. 32. P. 845-855.
4. Benkert S, Heidt F., Scholer D. “Calculation tool for earth heat exchangers GAEA”. *Proceeding of building simulation Fifth International IBPSA Conference. Prague*. 1997. Vol. 2. P. 9-16.
5. Filatov S. O., Volodin V. I. “Effektivnost ispolzovaniia energeticheskikh svai s teplonositelem vozduh v sistemakh ventilatsii i teplosnabzheniia”. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, T. 35. № 3. P. 44-50.
6. Basok B. I., Novitska M. P. “Теплофізичне моделювання повітряно-грунтового теплообмінника для теплової зв'язки фасадних стін експериментального енергоефективного будинку”. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2017. T. 39, № 1. P. 35-38.
7. Sehli A., Hasni A., Tamali M. “The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria”. *Energy Procedia*. 2012. no 18. P. 496-506.
8. Amara S., Nordell B., Benyoucef B. “Using Fougara for Heating and Cooling Buildings in Sahara”. *Energy Procedia*. 2011. no 6. P. 55-64.



9. Congendo P., Lorusso C., Baglivo C., Milanese M., Raimondo L. Experimental validation of horizontal air-ground heat exchangers (HAGHE) for ventilation systems". *Geothermics*, 2019. Vol. 80. P. 78-85. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.02.010
10. Sanusi Aliyah NurZafirah. *Low Energy Ground Cooling System for Buildings in Hot and Humid Malaysia*. PhD thesis. Demont fort University, 2012.
11. Noor AziahMohdAriffin, Aliyah NurZafirahSanusi. "Materials for the earth air pipe heat exchanger system as a passive ground cooling technology for hot humid climate". *Materials of nd International Conference on Emerging Trends in Scientific Research 2014 Pearl International Hotel, Kuala Lumpur 2nd & 3rd November 2014*. P. 1-12.  
URL: [http://irep.iium.edu.my/39826/5/2nd-ICETSR2014\\_NoorAziah\\_EAPHE\\_\(2\).pdf](http://irep.iium.edu.my/39826/5/2nd-ICETSR2014_NoorAziah_EAPHE_(2).pdf)
12. Krarti M., Kreider J. "Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel". *Energy Conversion and Management*. Vol. 37, No. 10, 1996. P. 1561-1574.
13. Nakorchevskij A. I., Belyaeva T. G. "Regressionnyj analiz glubin godovyh fluktuacij temperatur v verhnih sloyah grunta". *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2005. T. 27, № 6. P.86 -90.
14. Basok B. I., Avramenko A. A., Ryzhkov S. S., Lunina A. A. "Dinamika teploobmena zhidkosti v gruntovom priamolineinom odinochnom elemente (teploobmennike)". *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2009, T. 31, №1, S. 62-67.

УДК 697.97

## Численное моделирование параметров воздушно-грунтовых теплообменников

А. М. Недбайло<sup>1</sup>, И. К. Божко<sup>2</sup>, М. В. Ткаченко<sup>3</sup>, С. В. Андрейчук<sup>4</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики, г. Киев, Украина, [nan\\_sashulya@ukr.net](mailto:nan_sashulya@ukr.net), ORCID: 0000-0003-1416-9651

<sup>2</sup>к.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики, г. Киев, Украина, [bozhkoik@gmail.com](mailto:bozhkoik@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7458-0835

<sup>3</sup>к.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики, г. Киев, Украина, [tkamyr@gmail.com](mailto:tkamyr@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8345-1613

<sup>4</sup>м.н.с. Институт технической теплофизики, г. Киев, Украина, [sva011966@gmail.com](mailto:sva011966@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2507-0051

**Аннотация.** Целью данной работы является разработка численной модели круглогодичной работы теплообменника "земля-воздух" круглой формы сечения с последующим подтверждением на основе полученных экспериментальных данных. Эти исследования должны стать основой для разработки методов расчёта и проектирования геотермальных систем вентиляции для климатических условий Украины. Расчёты выполнялись на основе системы уравнений, характеризующих процессы аэродинамики и теплообмена в воздушно-грунтовом теплообменнике: сохранение импульса, сохранение энергии, кинетической энергии турбулентности, скорости диссипации кинетической энергии турбулентности. Для проведения экспериментальных исследований работы системы геотермальной вентиляции в Институте технической теплофизики Национальной академии наук Украины был создан экспериментальный стенд. Результаты экспериментальных исследований были использованы для проверки численной модели. Показано, что при слабом изменении среднесуточной температуры наружного воздуха расхождение результатов не превышает погрешности экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** геотермальная вентиляция, воздушно-грунтовый теплообменник, экспериментальные исследования, математическое моделирование, возобновляемые источники энергии.

UDC 697.97

## Numerical modelling of parameters of the operational parameters of an earth-to-air heat exchanger for geothermal ventilation

O. Nedbailo<sup>1</sup>, I. Bozhko<sup>2</sup>, M. Tkachenko<sup>3</sup>, S. Andreychuk<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dr. Hab., Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, [nan\\_sashulya@ukr.net](mailto:nan_sashulya@ukr.net), ORCID: 0000-0003-1416-9651

<sup>2</sup> Ph.D., Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, [bozhkoik@gmail.com](mailto:bozhkoik@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7458-0835

<sup>3</sup> Ph.D., Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, [tkamyr@gmail.com](mailto:tkamyr@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8345-1613

<sup>4</sup> junior researcher, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, [sva011966@gmail.com](mailto:sva011966@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2507-0051

**Abstract.** *The aim of this work is to develop a numerical model of the year-round operation of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) with a circular cross-sectional shape with further its validation based on the obtained experimental data. We consider that these studies can form the basis for the development of methods for calculating and designing geothermal ventilation systems for climate conditions of Ukraine. The analysis of literature sources showed that now there are quite a lot of studies devoted to the issues of geothermal ventilation. The results of such heat exchanger modeling with various geometric data and which operate in their authentic soils under various hydraulic regimes and that are located at different depths are widely presented. However, these studies do not allow obtaining generalized patterns of heat transfer during the operation of the heat exchangers and the influence of the geometric parameters of the heat exchanger on the operation of the geothermal ventilation system as a whole. Much attention is paid to the issues of modelling the operation of such heat exchangers and the distinctive features of each of these models. Also important are the results of experimental studies carried out on our own experimental bench and with the help of which the numerical model was validated. To conduct experimental research on the operation of the geothermal ventilation system at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine an experimental stand was created. This stand is designed to study thermophysical processes during the operation of a geothermal ventilation system elements. The results of these studies are the basis for the development of a method for determining the optimal diameter of the earth-to-air heat exchanger under operating conditions for soil in Kyiv, Ukraine.*

**Keywords:** *geothermal ventilation, earth-to-air heat exchanger, experimental studies, numerical modeling, renewable energy sources.*

Надійшла до редакції / Received 23.11.2020

УДК 504.064.2

## Оцінка впливу систем вентиляції на мікробіологічну безпеку та мікрокліматичні умови приміщень

Т. І. Кривомаз<sup>1</sup>, Д. В. Варавін<sup>2</sup>, Р. В. Сіпаков<sup>3</sup>, Р. С. Кузьмішина<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, [ecol@i.ua](mailto:ecol@i.ua),  
ORCID: 0000-0002-4161-9702

<sup>2</sup> асп. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, [d.varavin@icloud.com](mailto:d.varavin@icloud.com),  
ORCID: 0000-0002-4161-9702

<sup>3</sup> асп. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, [r.sipakov@icloud.com](mailto:r.sipakov@icloud.com),  
ORCID: 0000-0002-0862-5043

<sup>4</sup> студ. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, [kuzmishuna02raisa@gmail.com](mailto:kuzmishuna02raisa@gmail.com)

*Анотація. Проаналізовано ключові аспекти впливу мікробіологічного забруднення на системи вентиляції і кондиціонування повітря, мікроклімат приміщень та здоров'я людей. Кількісний і якісний склад мікрофлори приміщень залежить від їхнього функціонального призначення, конструктивних особливостей, умов експлуатації, клімату та інших факторів, серед яких суттєве значення має спосіб вентиляції. Особливу небезпеку становлять зволожувачі систем кондиціонування повітря, які мають достатньо води для життєдіяльності і розмноження бактерій і грибків. Крім того, в системах вентиляції накопичуються забруднювачі, що служать субстратом для живлення мікроорганізмів. Багатоповерхові адміністративно-громадські та житлові будівлі, промислові споруди та інші місця масового скупчення людей – це зони підвищеної аеробіологічної небезпеки поширення інфекцій. Системи кондиціонування повітря й вентиляції при неправильній експлуатації можуть стати джерелами поширення мікроорганізмів у будь-яких приміщеннях. Передача інфекційного аерозолі на великі відстані відбувається у людних приміщеннях з поганою вентиляцією. Ключовим фактором для спалаху інфекції є напрямок повітряного потоку. В умовах пандемії COVID-19 організації та міжнародні установи щодо контролю за розповсюдженням SARS-CoV-2 у приміщеннях рекомендують обмежувати рециркуляцію відпрацьованого повітря, хоча наразі ще недостатньо даних для однозначного з'ясування ролі систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у поширенні інфекції. Оцінка ризику та рішення щодо вибору систем кондиціонування повітря повинні бути динамічними та базуватися на масштабах розвитку пандемії, а також на верифікації характеристик систем та їхньої ефективності.*

*Ключові слова: мікробіологічне забруднення, мікроклімат, система вентиляції, екологічна безпека.*

**Вступ.** Більшу частину життя люди проводять у будівлях, де зажди присутні мікроорганізми – патогенні, умовно-патогенні або нейтральні. У більшості випадків їхній вплив на мешканців та мікроклімат приміщень залишається недостатньо дослідженим. Позбутися навколишньої мікрофлори неможливо. Однак, можливо вплинути на її видовий склад і кількісне співвідношення. Для цього необхідно знати, які чинники впливають на мікробні асоціації будівель.

Кількісний і якісний склад мікрофлори приміщень залежить від їхнього функціонального призначення, конструкційних особливостей, умов експлуатації, клімату та інших факторів, серед яких суттєве значення має спосіб вентиляції. Системи вентиляції та кондиціонування повітря повинні покращувати стан повітря в приміщеннях і позитивно впливати на здоров'я. Однак, за певних умов вони не лише не покращують показники внутрішнього середовища, але і служать джерелом небезпечних для здоров'я мікроорганізмів.

Особливо ця проблема набуває актуальності під час пандемії COVID-19, коли люди виму-

шені ще більше часу проводити у закритих приміщеннях. При цьому якість мікроклімату виходить на перший план. Ефективне функціонування систем вентиляції та кондиціонування повітря задля дотримання високих стандартів якості внутрішнього повітря забезпечують комфорт та сприяють збереженню здоров'я населення.

**Актуальність дослідження.** Робота вентиляційних установок, що визначають якість повітря, повинна знаходитися під постійним мікробіологічним контролем. Тому в останні роки багато уваги приділяється обстеженню мікрофлори систем вентиляції та кондиціонування приміщень.

Серед загальної кількості випадків корозійного руйнування обладнання теплоенергетики та кондиціонування повітря в умовах експлуатації понад 50 % обумовлено життєдіяльністю корозійно-агресивних мікроорганізмів [5]. Якщо сульфатредуцентні і тіонові бактерії потрапляють до систем вентиляції та теплогазопостачання, вони не лише забруднюють охолоджувальні системи і знижують теплопередачу, але й викликають корозію

матеріалів обладнання [11].

Фінансові збитки від мікробіологічної корозії у Великобританії кожен рік становлять щонайменше 1200 млн. фунтів стерлінгів [7]. У США щорічні втрати від мікробіологічної корозії трубопроводів тільки під дією анаеробних сульфатредуцентних бактерій оцінюються у 2000 млн. доларів [8].

У системах механічної вентиляції та кондиціонування повітря за певних обставин можуть створюватись умови, сприятливі для зростання потенційно патогенних мікроорганізмів, які викликають захворювання органів дихання та алергії. Профілактичні заходи передбачають регулярні процедури технічного обслуговування обладнання, очищення всіх водовмісних елементів від біоцидів та заміну фільтрів [5].

У зв'язку з пандемією COVID-19 активно досліджується повітряна трансмісія SARS-CoV-2. На сьогодні немає достатньо даних для однозначного з'ясування ролі систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у поширенні COVID-19 [7]. Однак, у ряді європейських країн уже опубліковано технічні вказівки щодо обмеження роботи систем кондиціонування повітря та рециркуляції відпрацьованого повітря [11]. Проте обмеження використання кондиціонерів та систем опалення може створити тепловий дискомфорт і негативно вплинути на здоров'я та продуктивність праці.

У зв'язку з зазначеним, оцінка мікробіологічних ризиків зараження, пов'язаних з використанням систем вентиляції, набуває особливої актуальності для прийняття правильних рішень і забезпечення належного стану екологічної безпеки в приміщеннях.

**Останні дослідження та публікації.** Уперше увагу на проблему мікробіологічного забруднення вентиляційних систем звернули у 1976 р., коли під час з'їзду Американського легіону у Філадельфії (США) на пневмонію захворіло 221 учасник, 34 з яких померло. Згодом з'ясувалося, що спалах інфекції викликали бактерії, виділені із охолоджувальної рідини кондиціонерів. Тому в пам'ять загиблих учасників з'їзду вони отримали назву *Legionella*.

Природним резервуаром представників цього роду бактерій слугують прісні водойми. Але *Legionella* також освоїла штучну нішу систем кондиціонування повітря і вентиляції. Там циркулює вода оптимальної температури, а дрібнодисперсний аерозоль сприяє поширенню техногенної інфекції. Патогенними для людей є 17 з 41 видів *Legionella*. При цьому 90 % легіонельозів пов'язують з видом *L. pneumophila*, а інші випадки спричинені видами *L. micdadei*,

*L. longbeuchae*, *L. dumoffii* та *L. Bozemanii* [4].

Згадані бактерії висіваються з рідин:

- кондиціонерів;
- промислових і побутових систем охолодження;
- систем питної води;
- басейнів;
- бойлерних і душових установок;
- обладнання для респіраторної терапії;
- акваріумів;
- водограїв.

Ці аеробні, грамнегативні, внутрішньоклітинні патогени часто колонізують гумові поверхні, наприклад, шланги водопровідного, медичного і промислового обладнання.

Слід підкреслити, що незважаючи на широке розповсюдження, епідемічної небезпеки дана інфекція практично не представляє. Так, протягом 1949–2015 рр. із 47 повідомлень зафіксовано 805 випадків легіонельозів, дев'ять з яких виявились летальними [10]. Профілактика цього захворювання не передбачає ніяких особливих санітарно-епідемічних заходів крім звичайної санітарної обробки обладнання. Але бактерія може зберігатись у важкодоступних частинах конструкцій.

Однак, обмежувальні заходи, пов'язані з пандемією COVID-19, викликали додаткову небезпеку через застій води в трубопровідних системах громадських та виробничих приміщень, які були закриті на час карантину. Внаслідок цього створились умови, що сприяють розмноженню патогенних бактерій, серед яких представники роду *Legionella*. Зафіксовано випадки виникнення відповідних інфекцій, пов'язаних з використанням водних систем [8]. У зв'язку з цим виникає необхідність заходів моніторингу та знезараження систем водопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря безпосередньо перед відкриттям будівель після карантину.

Викликає занепокоєння і безпосереднє поширення вірусу SARS-CoV-2 через системи циркуляції повітря. Результати, отримані внаслідок досліджень попередніх епідемій коронавірусів, свідчать про небезпеку шляхів зараження через конструктивні дефекти або розрегулювання системи розподілу повітря з незбалансованою витратою в припливних і витяжних пристроях. При цьому виникає позапроектне перетікання повітря між приміщеннями.

Більшість з цих фактів було зібрано під час епідемії MERS. Поки невідомо, чи розповсюджується аналогічним чином вірус SARS-CoV-2. Водночас шість із семи досліджень респіраторних вірусних інфекцій довели, що системи кондиціонування повітря відіграли роль

у розповсюдженні захворювань.

Системи кондиціонування повітря, правила та вимоги до їхнього технічного обслуговування можуть різнитися поміж країнами. Тому наявні дослідження поки що не узагальнено. Наразі неможливо аргументовано довести забруднення систем вірусними частинками SARS-CoV-2. [7]. З іншого боку, накопичені знання про новий SARS-CoV-2 свідчать про те, що він має вищу аерозольну та поверхневу стабільність, ніж SARS-COV-1. Він може залишатися життєздатним та інфекційним в аерозолі протягом годин [9]. Експериментальні дослідження показали, що аерозольні частинки SARS-CoV-2 залишаються у повітрі не менше трьох годин зі збереженням життєздатності до однієї години в повітрі та до доби на поверхнях [6]. Період напіввиведення вірусних частинок може бути різним залежно від метеорологічних умов, які можуть послабити вірус [7]:

- температура;
- відносна вологість;
- ультрафіолетове випромінювання.

Передача інфекційного аерозолі на великій відстані відбувається у людських приміщеннях з поганою вентиляцією. Ключовим фактором для спалаху інфекції є напрямок повітряного потоку. Таким чином, належні мікрокліматичні умови в будівлях мають велике значення для здоров'я мешканців, працівників та відвідувачів.

**Формулювання цілей статті.** Мета дослідження – з'ясувати ключові аспекти впливу мікробіологічного забруднення систем вентиляції і кондиціонування повітря на мікроклімат приміщень та здоров'я користувачів.

**Аналіз видового складу мікроорганізмів у повітрі та системах вентиляції.** Мікроорганізми відіграють важливу роль у стані мікроклімату приміщень. Їхня кількість у повітрі будівель перевищує вміст в атмосферному повітрі. Іноді це перевищення досягає сотень разів. Однак, мікрофлора повітря закритих приміщень без систем вентиляції більш одноманітна і відносно стабільна порівняно зі складом мікроорганізмів відкритих просторів. В 1 м<sup>3</sup> повітря житлових приміщень налічують 20 000 мікроскопічних біоб'єктів, серед яких бактерії, грибки та віруси [2]. Їхня життєздатність у повітрі залежить від стійкості до висушування, ультрафіолетового випромінювання та інших факторів. Мікроорганізми активно розмножуються в теплому і вологому середовищі, особливо в затемнених місцях, на різноманітних субстратах і частинках пилу.

У житлових та громадських приміщеннях домінують мешканці носоглотки людини,

зокрема, стрептококи, пневмококи, дифтероїди, стафілококи, в тому числі патогенні види. Вони виносяться назовні в процесі дихання, кашляння і чхання людей.

У повітрі часто виявляються спори аеробних паличок роду *Bacillus*, пігментовані штами бактерій родів *Sarcina* і *Staphylococcus*, а також гриби родів *Penicillium*, *Aspergillus*, *Rhodotorula* та ін. У домашньому пилу переважають бактерії людської шкіри (*Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium* і *Propionibacterium*), вагіни (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium* і *Lactococcus*) і фекалій (*Bacteroides*, *Faecalibacterium* і *Ruminococcus*). При цьому відмічають гендерну спеціалізацію мікрофлори: у будинках, де більше чоловіків, переважають види родів *Corynebacterium*, *Dermabacter* і *Roseburia*, а в «жіночих» будинках – *Lactobacillus*.

Ідентифіковано 56 родів бактерій, наявність яких у будинках пов'язана з присутністю собак, і 24 родів, які свідчать про присутність у помешканнях котів. У домашньому середовищі також трапляються мікроорганізми, характерні для комах – *Wolbachia*, *Buchnera*, *Rickettsia* і *Bartonella*.

Склад мікроорганізмів у безпосередній близькості біля будинків відрізняється від внутрішньої мікрофлори. Ззовні переважають бактерії порядків *Actinomycetales* і *Sphingomonadales* та гриби родів *Cladosporium* і *Toxicocladosporium* [1]. При цьому відмінності більш характерні для бактерій, ніж для грибів.

Більшість останніх потрапляє до будівель ззовні. Тому 65 % видів грибів трапляються і в будинку і в навколишньому середовищі. Загалом видова різноманітність мікрофлори в будинку приблизно на 50 % вище, ніж ззовні.

На відміну від бактеріальної, мікофлора внутрішніх приміщень відрізняється меншою різноманітністю, ніж зовні. Мікроскопічні гриби здатні викликати цілий спектр захворювань, особливо дихальних шляхів, які важко визначаються і лікуються. При цьому тимчасові нездужання і хронічні хвороби можуть викликати не тільки мікроміцети, а й токсичні продукти їхнього метаболізму. Навіть якщо летючі органічні сполуки грибів мають відносно низьку токсичність, вони можуть спричинити головний біль, відчуття дискомфорту і гострі порушення дихання.

Характерними представниками в будинках є види родів *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* і *Fusarium*, а також деякі дереворуйнівні гриби – *Stereum*, *Trametes*, *Phlebia* і *Ganoderma*. «Домашніми» можна вважати гриби, що живуть на шкірі та слизових поверхнях людей. Такими є

*Candida* і *Trichosporon*, а також дріжджі *Saccharomyces*. Більшість з них нешкідливі. Однак, *Aspergillus flavus* утворює гепатотоксичні сполуки – афлатоксини. Такі речовини можуть викликати масові отруєння і ряд небезпечних захворювань людини. У повітрі приміщень частіше зустрічаються *Aspergillus versicolor*, *Penicillium aurantiogriseum*, *P. viridicatum*) і *Trichoderma* [1]. Розвиток грибів у приміщеннях насамперед залежить від мікрокліматичних показників вологості, температури, запилення, вентиляції та теплоізоляції.

Зазвичай гриби розвиваються в темних, сирих і непродіряваних місцях з відповідними субстратами. Крім того, видовий мікологічний склад залежить від географічного положення будинку і кліматичних умов місцевості.

Дослідження розвитку мікрофлори у квартирах нових будинках не виявили значних змін концентрації або типів мікробіологічного забруднення між першим та другим роками заселення. Проте підвищення вологості та зниження температури зовнішнього повітря, а також вітри з північного сходу сприяли підвищенню концентрації бактерій та грибів.

При порівнянні зразків повітря з кухонь, віталень, спалень та ванних кімнат не виявлено значних відмінностей у концентраціях повітряної мікрофлори, незважаючи на значну популяцію бактерій і дріжджів на вологих поверхнях кухонь і ванних кімнат.

Середня концентрація бактерій у повітрі становила 98 КУО/м<sup>3</sup> (26...372 КУО/м<sup>3</sup>) у приміщенні та 101 КУО/м<sup>3</sup> (28...364 КУО/м<sup>3</sup>) ззовні. КУО – колонієутворювальні одиниці, що визначаються як число колоній на агаровому живильному середовищі, які виростили з відрізнених зразків. Середня концентрація грибків у повітрі становила 198 КУО/м<sup>3</sup> (58...673 КУО/м<sup>3</sup>) у приміщенні та 362 КУО/м<sup>3</sup> (113...1158 КУО/м<sup>3</sup>) на відкритому повітрі [6].

Дослідження мікробіологічного забруднення повітря в різних приміщеннях університетських будівель у Познані (Польща) виявили, що в усіх місцях у другій половині дня спостерігалось збільшення кількості бактерій та грибних спор. Очевидно, що це корелює із циркуляцією потоків студентів і викладачів.

Найчастіше у зразках повітря траплялися представники родів бактерій і грибів *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Serratia*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Cladosporium* та *Alternaria*. Серед виявлених мікроорганізмів було відзначено наявність патогенних та алергенних видів [11].

Штами бактерій, що утворюються в лікарнях, відрізняються надзвичайною агресивністю і стійкістю до більшості антибіотиків.

У повітрі лікарняних приміщень домінують золотистий стафілокок і стрептококи у співвідношенні 70 % до 30 % відповідно.

Метицилінрезистентний *Staphylococcus aureus* став причиною смертоносної епідемії серед немовлят у пологових відділеннях багатьох розвинених країн. А у дорослих пацієнтів цей штам стафілококу підвищує ймовірність летального результату на 64 %, ніж у носіїв звичайної форми цієї бактерії. Цей та інші інфекційні штами зародилися і поширилися саме в лікарнях, причому в умовах найбільш суворої гігієни. При цьому ризик інфікування поширюється не тільки на пацієнтів, але й на лікарів і обслуговувальний персонал лікарень [3].

З іншого боку, у приміщеннях, де не дотримуються санітарних вимог, бактеріальна забрудненість повітря зростає за рахунок інших патогенних видів *Staphylococcus*, *Streptococcus pyogenes*, *Pseudomonas aeruginosa* і бактерій групи *Escherichia coli*, якщо концентрація останніх досягає 100 КУО/м<sup>3</sup> [2].

У частинках пилу приміщень патогенні бактерії можуть зберігати життєздатність і контагіозність дуже довгий час:

- гемолітичний стрептокок – 2-3 місяці;
- бруцели – від 20 до 70 днів;
- *Mycobacterium tuberculosis* – до року.

Віруси застуди та грипу можуть виживати протягом 18 годин на твердих поверхнях [3]. Вважають, що запиленість приміщень має велике значення у виникненні спалахів бактеріальних інфекцій та поширенні збудників мікозів, зокрема гістоплазмозу і кокцидіодомікозу. Можливість зараження пиловими частинками, що містять патогенні мікроорганізми, доведена для туберкульозу, сибірської виразки, бруцельозу, Ку-лихоманки, туляремії, дифтерії та ін.

Слід підкреслити, що зазвичай бактерії в повітрі більшості приміщень не становлять небезпеки для здоров'я. Адже серед них домінують грам-позитивні мікроорганізми, які мешкають на шкірі і в верхніх дихальних шляхах здорових людей. Однак, якщо концентрація мікроорганізмів значно підвищена, це свідчить про надмірну скупченість людей, недостатню санітарію та погану вентиляцію приміщень.

Таким чином, кількісний та якісний склад мікроорганізмів у громадських місцях залежить від щільності і активності руху людей, а також від санітарного-технічного стану приміщень. Останній визначається вентиляцією, частотою провітрювання, запиленістю, якістю прибирання, вологістю, освітленістю та іншими фа-

кторами.

Сучасні багатоповерхові адміністративно-громадські та житлові будівлі, промислові споруди та інші місця масового скупчення людей – це зони підвищеної аеробіологічної небезпеки поширення інфекцій. При цьому системи кондиціонування повітря й вентиляції при неправильній експлуатації можуть стати джерелами поширення мікроорганізмів у будь-яких приміщеннях. Темне, вологе й тепле середовище вентиляційних каналів вважається ідеальним для підтримання життєздатності більшості мікроорганізмів.

Особливу небезпеку становлять зволожувальні компоненти систем кондиціонування повітря. Вони забезпечують бактерії та гриби водою, необхідною для життєдіяльності й розмноження. Крім того, у системах вентиляції й кондиціонування повітря накопичуються забруднювачі, що слугують субстратом для живлення мікроорганізмів. Разом з повітрям до систем вентиляції потрапляють будь-які зважені частинки з приміщень:

- побутовий або будівельний пил;
- шерсть тварин;
- волосся людей;
- ворс від одягу та килимових покриттів.

На стінки вентиляційних каналів налипають жирові відкладення, багаті поживними речовинами для розвитку мікроорганізмів.

Саме по собі повітря не є живильним середовищем для мікроорганізмів, але слугує засобом їхнього переміщення. Потoki повітря переносять спори грибів, бактеріальні клітини та інші мікроскопічні частинки і біооб'єкти. Однак, системи вентиляції й кондиціонування повітря служать для цього зручними транспортними шляхами.

Життєздатність мікроорганізмів у повітрі забезпечують зважені частинки води, слизу та пилу. У повітрі мікроорганізми знаходяться у стані аерозолі. Це – суспензія мікробних клітин, адсорбованих на пилових частинках, або скомпонованих у «краплинні ядра».

Зазначені частинки мають розмір від 0,001 до 100 мкм, які представлені трьома основними фазами. У крапельній (великоядерній) фазі клітини мікроорганізмів оточені водно-сольковою оболонкою. Діаметр такої частки становить в середньому 0,1 мм. Вона знаходиться в повітрі всього кілька секунд і переміщується зі швидкістю приблизно 30 см/с [4].

Дрібні крапельки аерозолі висихають і залишаються в повітрі в підвішеному стані. Вони утворюють стійку аеродисперсну систему, де частково зберігається волога, що підтримує життєздатність мікроорганізмів. При

висиханні цих частинок утворюється дрібно-ядерна фаза. У ній діаметр не перевищує 0,05 мм.

Швидкість осідання цих часток становить 0,013 см/с. При цьому вони здатні швидко переміщуватися на великі відстані. Саме ця фаза виявляє найбільшу епідеміологічну небезпеку. Таким шляхом поширюється більшість збудників повітряно-крапельних інфекцій, особливо малостійких до зовнішніх впливів (наприклад, збудник коклюшу).

Третя фаза складається з більш великих часток, розмір яких варіює від 0,01 до 1 мм. Швидкість переміщення залежить від швидкості повітряних потоків. Цей «бактеріальний пил» осідає на різних предметах. Він служать джерелом інфекцій, особливо у випадку стійких до висушування біооб'єктів – мікобактерій, кластридій, стафілококів, стрептококів, грибних спор.

Найбільш небезпечними є частинки з розміром від 0,05 до 5 мкм. Вони затримуються в бронхіолах і альвеолах. Саме ця фракція пилових частинок береться до уваги в сучасній класифікації чистих приміщень.

Частинки з розміром від 10 мкм і більше затримуються у верхніх відділах дихальних шляхів і виводяться з них [2].

Небезпека мікробного аерозолі для здоров'я людей обумовлена не тільки повітряно-крапельним механізмом передачі при ряді інфекційних захворювань. Також небезпечними є алергічні реакції та інтоксикації продуктами мікробного метаболізму.

В 1 г пилу може міститися до 1 млн. біооб'єктів. Бактерії і спори мікроміцетів циркулюють вентиляційними каналами і потрапляють до приміщень. При вдиханні людиною ці частинки служать джерелом респіраторних, інфекційних, алергічних, імунних і небезпечних хронічних захворювань.

Присутність у повітрі великої кількості грамнегативних бактерій або представників *Actinomycetales* свідчить про наявність у приміщеннях поверхонь підвищеної вологості, дренажних пристроїв або зволожувачів систем підігріву, вентиляції та кондиціонування повітря, де і живуть ці мікроорганізми. Небезпечні патогени можуть з'являтися у вентиляції в результаті попадання в шахти тварин, птахів і комах, які служать їх переносниками.

Дослідження систем вентиляції та кондиціонування повітря музейних приміщень виявило 48 видів грибків з 24 родів з відділів *Ascomycota*, *Zygomycota* і анаморфних грибків. Найпоширенішим виявилися види *Penicillium aurantiogriseum*, *Cladosporium herbarum*, *C.*

*sphaerospermum*, *Eurotium repens*, *Aspergillus versicolor* [2]. Джерелом всіх видів грибів, виявлених на фільтрах в вентиляційних каналах, був пил залів і сховищ. Виняток склали лише два види *Penicillium waksmanii* і *Wallemia sebi*, які траплялись виключно на фільтрах систем кондиціонування повітря.

У зволожувальній установці системи кондиціонування повітря було виявлено більше видів мікроміцетів, оскільки тут створюються більш сприятливі умови для розмноження грибків. У лабораторних умовах на поживних середовищах були виділені *Aspergillus ochraceus*, *Chaetomium globosum*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Eurotium repens*, *Penicillium aurantiogriseum* [4].

У цілому дослідники відзначають відносно бідність видового складу і невелику кількість багатьох видів у всіх пробах з елементів систем забезпечення мікроклімату музейних приміщень. Це ймовірно пов'язано з конструктивними особливостями систем кондиціонування повітря в музеї.

Коли спори мікроміцетів потрапляють на фільтри вентиляційних установок, вони знаходяться в постійному потоку повітря. Це сприяє їхньому висушуванню й загибелі. Однак, вдихання спор токсикогенних видів грибів становить потенційну небезпеку, зокрема спор *Stachybotrys*. Останні містять високі концентрації надзвичайно сильних мікотоксинів. Ці гриби асоційовані з паперовими шпалерами та іншими матеріалами з вмістом целюлози у вологих приміщеннях.

У ході дослідження порівняння мікробіологічного складу різних систем вентиляції в 15 офісних будівлях найпоширенішими бактеріями виявилися грамозитивні коки (головним чином з родів *Staphylococcus* та *Micrococcus / Kocuria*) та ендоспороутворювальні грамозитивні палички роду *Bacillus*. Серед грибів домінували представники родів *Penicillium*, *Aspergillus* та *Cladosporium*.

Концентрація бактерій і мікроміцетів у природно провітрюваних офісних будівлях становила від 70 до 1600 КУО/м<sup>3</sup>. В офісах, обладнаних системами кондиціонування повітря та механічної вентиляції, концентрації були нижчими – 10...530 КУО/м<sup>3</sup> та 20...410 КУО/м<sup>3</sup> відповідно. Аналіз розподілу за розмірами показав, що мікроорганізми в повітрі представлено переважно поодинокими клітинами (1,1...3,3 мкм) та у формі великих агрегатів (4,7...>7 мкм). Таким чином, ефективні системи механічної вентиляції та кондиціонування забезпечують кращу гігієнічну якість офісних будівель, ніж природна вентиляція [8].

**Рекомендації щодо функціонування систем вентиляції та кондиціонування повітря в умовах пандемії COVID-19.** Найбільш ефективними методами зменшення мікробіологічного забруднення систем опалення, вентиляції і кондиціонування повітря є збільшення швидкості потоку повітря та мінімізація рециркуляції із введенням та обробкою зовнішнього повітря. З появою ефективних теплоутилізаторів відмова від рециркуляції не спричинить значних перевитрат енергії на обробку повітря.

Усі системи повинні бути спроектовано таким чином, щоб уникнути в робочій зоні потоків повітря, які здатні транспортувати краплі та аерозолі на великі відстані. Ефективність фільтрів може бути підвищена за допомогою наноматеріалів [7].

У багатьох закладах охорони здоров'я можливе утворення аерозолів та підвищена мінливість вірусного навантаження у пацієнтів, що зумовлює необхідність пристосування безпеки систем до конкретних потреб. Тому в медичних закладах засоби інженерного контролю мікрокліматичних умов повинні передбачати

- правильно визначений дисбаланс повітря;
- вентиляцію з розведенням потоків;
- високоефективну фільтрацію твердих частин;
- ультрафіолетове опромінення;
- пристрої для очищення аерозольних забруднень [5].

Профілактика на робочих місцях повинна бути персоналізованою з урахуванням можливості прийняття більш суворих запобіжних заходів за відповідних епідеміологічних обставин. Такими є збільшення кількості випадків інфікування та госпіталізацій.

В інших типах будівель як альтернатива пропонується запровадити місцеву вентиляцію робочих місць місцевими системами [10]. Також у [10] пропонується перехід на природний приплив повітря, хоча це рішення суперечить вимогам енергоефективності і призводить до практично неконтрольованого стану повітряного середовища. Тому остання рекомендація є недоцільною і може лише погіршити ситуацію.

Через неможливість виживання мікроорганізмів при температурі кипіння води перехід на парове зволоження з термічним отриманням пари здатен покращити мікробіологічний стан. Це досягається лише за умови уникнення конденсації вологи в повітроводах. Для цього має бути забезпечено достатню витрату повітря. Подачу пари має бути розпочато лише після виходу вентилятора на розрахункову частоту обертання і повністю припинено до початку зупинення останнього.



При ультразвуковому випаровуванні води температура змінюється незначно, а енергія і частота ультразвуку можуть бути недостатніми для руйнування всіх клітин мікроорганізмів, і, тим паче, вірусів. Тому парові зволожувачі з ультразвуковим випаровуванням можуть становити небезпеку мікробного зараження, як і контактні.

Загалом оцінка ризику та рішення щодо вибору систем кондиціонування повітря повинні бути динамічними та базуватися на масштабах розвитку пандемії, а також на верифікації характеристик систем та їхньої ефективності.

**Висновки.** Ефективне функціонування систем вентиляції та кондиціонування повітря не тільки забезпечує комфорт, але й сприяє збереженню здоров'я населення. Передача інфек-

ційного аерозолі на великі відстані відбувається в людних приміщеннях з поганою вентиляцією. Системи кондиціонування повітря й вентиляції при неправильному налаштуванні або експлуатації можуть стати транспортними шляхами поширення мікроорганізмів. Особливу мікробіологічну небезпеку становлять зволожувачі та накопичення забруднювачів, а також перетікання повітря між різними приміщеннями будівель. Системи природної вентиляції становлять значно більшу небезпеку ніж правильно налаштована механічна. Рекомендується віддавати перевагу паровому зволоженню повітря з термічним отриманням пари та відмовитися від контактного зволоження повітря. При цьому необхідно унеможливити конденсацію пари в повітроводах.

### Література

1. Кривомаз Т. І. Микроорганизмы в наших жилищах / Т. І. Кривомаз // Фармацевт практик. – 2018. – № 4. – с. 36-38.
2. Кривомаз Т. І. Микроорганизмы в общественных местах / Т. І. Кривомаз // Фармацевт практик. – 2018. – № 5. – с. 28-29.
3. Кривомаз Т. І. Микроорганизмы в больницах / Т. І. Кривомаз // Фармацевт практик. – 2018. – № 6. – с. 24-26.
4. Кривомаз Т. І. Микроорганизмы в вентиляционных системах / Т. І. Кривомаз // Фармацевт практик. – 2018. – № 7/8. – с. 40-41.
5. Ager B.P. The control of microbiological hazards associated with air-conditioning and ventilation systems / B.P. Ager, J.A. Tickner // The Annals of Occupational Hygiene. – Vol. 27, Issue 4. – 1983. – p. 341–358. <https://doi.org/10.1093/annhyg/27.4.341>
6. Bogler A. Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic / A. Bogler, A. Packman, A. Furman, A. Gross // Nature Sustainability. – 2020. – Vol. 3. – p. 981–990. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00605-2>
7. Chirico F. Can air-conditioning systems contribute to the spread of SARS/MERS/COVID-19 infection? Insights from a rapid review of the literature / F. Chirico, A. Sacco, N. L. Bragazzi, N. Magnavita // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – Vol. 17. – p. 1-11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176052>
8. Gołofit-Szymczak M. Microbiological air quality in office buildings equipped with ventilation systems / M. Gołofit-Szymczak, R.L. Górny // Indoor air. – 2018. – Vol. 28, Issue 6. – p. 792-805. <https://doi.org/10.1111/ina.12495>
9. Macher J. M. A Two-Year Study of Microbiological Indoor Air Quality in a New Apartment / J. M. Macher, F.-Y. Huang, M. Flores // Environmental Health: An International Journal. – 1991. – Vol. 46, Issue 1. – p. 25-29.
10. Palazzolo C. Legionella pneumonia: increased risk after COVID-19 lockdown? / C. Palazzolo, G. Maffongelli, A. D'Abramo, L. Lepore, A. Mariano, A. Vulcano, T.A. Bartoli, N. Bevilacqua, M.L. Giancola, E. Di Rosa, E. Nicastrì // Euro Surveill. – 2020. – 25(30). – p. 12-25. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.30.2001372>
11. Strykowska-Sekulska M. Microbiological Quality of Indoor Air in University Rooms / M. Strykowska-Sekulska, A. Piotraszewska-Pająk, A. Szyszka, M. Nowicki, M. Filipiak // Pol. J. Environ. Stud. – 2007. – 16(4). – p. 623–632.

### References

1. Krivomaz T. I. "Microorganismy v nashikh zhilishchakh". *Farmatsevt praktik*. 2018. No 4. P. 36-38.
2. Krivomaz T. I. "Microorganismy v obshchestvennykh mestakh". *Farmatsevt praktik*. 2018. No 5. P. 28-29.
3. Krivomaz T. I. "Microorganismy v bolnitsakh". *Farmatsevt praktik*. 2018. No 6. P. 24-26.
4. Krivomaz T. I. "Microorganismy v ventilyatsionnykh sistemakh". *Farmatsevt praktik*. 2018. No 7/8. P. 40-41.
5. Ager B.P., Tickner J.A. "The control of microbiological hazards associated with air-conditioning and ventilation systems". *The Annals of Occupational Hygiene*. 1983. Vol. 27, Iss. 4. P. 341–358. <https://doi.org/10.1093/annhyg/27.4.341>
6. Bogler A., Packman A., Furman A., Gross A. "Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic". *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3. P. 981–990. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00605-2>
7. Chirico F., Sacco A., Bragazzi N. L., Magnavita N. "Can air-conditioning systems contribute to the spread of SARS/MERS/COVID-19 infection? Insights from a rapid review of the literature". *International Journal of*

*Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. P. 1-11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176052>

8. Gołofit-Szymczak M., Górny R.L. “Microbiological air quality in office buildings equipped with ventilation systems”. *Indoor air*. 2018. Vol. 28, Iss. 6. P. 792-805. <https://doi.org/10.1111/ina.12495>

9. Macher J. M., Huang F.-Y., Flores M. “A Two-Year Study of Microbiological Indoor Air Quality in a New Apartment”. *Environmental Health: An International Journal*. 1991. Vol. 46, Iss. 1. P. 25-29.

10. Palazzolo C., Maffongelli G., D’Abramo A., Lepore L., Mariano A., Vulcano A., Bartoli T.A., Bevilacqua N., Giancola, Di Rosa E., Nicastrì E. “Legionella pneumonia: increased risk after COVID-19 lockdown?”. *Euro Surveill*. 2020. 25(30). P. 12-25. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.30.2001372>

11. Stryjawska-Sekulska M., Piotraszewska-Pająk A., Szyszka A., Nowicki M., Filipiak M. “Microbiological Quality of Indoor Air in University Rooms?”. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007. Vol.16. No 4. P. 623–632.

УДК 504.064.2

## Оценка влияния систем вентиляции на микробиологическую безопасность и микроклиматические условия помещений

Т. И. Кривомаз<sup>1</sup>, Д. В. Варавин<sup>2</sup>, Р. В. Сипаков<sup>3</sup>, Р. С. Кузьмишина<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [ecol@i.ua](mailto:ecol@i.ua),  
ORCID: 0000-0002-4161-9702

<sup>2</sup> асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [d.varavin@icloud.com](mailto:d.varavin@icloud.com),  
ORCID: 0000-0002-4161-9702

<sup>3</sup> асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [r.sipakov@icloud.com](mailto:r.sipakov@icloud.com),  
ORCID: 0000-0002-0862-5043

<sup>4</sup> студ. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [kuzmishuna02raisa@gmail.com](mailto:kuzmishuna02raisa@gmail.com)

**Аннотация.** Проанализированы ключевые аспекты влияния микробиологического загрязнения на системы вентиляции и кондиционирования воздуха, микроклимат помещений и здоровье людей. Количественный и качественный состав микрофлоры помещений зависит от их функционального назначения, особенностей, условий эксплуатации, климата и других факторов, в том числе существенное значение имеет способ вентиляции. Особую опасность представляют увлажнители систем кондиционирования воздуха, которые имеют достаточно воды для жизнедеятельности и размножения бактерий и грибов. Кроме того, в системах вентиляции накапливаются загрязнители, служащие субстратом для питания микроорганизмов. Многоэтажные административно-общественные и жилые здания, промышленные сооружения и другие места массового скопления людей – это зоны повышенной аэриобиологической опасности распространения инфекций. Системы кондиционирования воздуха и вентиляции при неправильной эксплуатации могут стать источниками распространения микроорганизмов в любых помещениях. Передача инфекционного аэрозоля на большие расстояния происходит в людных помещениях с плохой вентиляцией. Ключевым фактором для вспышки инфекции является направление воздушного потока. В условиях пандемии COVID-19 организации и международные учреждения по контролю за распространением SARS-CoV-2 в помещениях рекомендуют ограничивать рециркуляцию отработанного воздуха, хотя пока ещё недостаточно данных для однозначного выяснения роли систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в распространении инфекции. Оценка риска и решения по выбору систем кондиционирования воздуха должны быть динамичными и базироваться на масштабах развития пандемии, а также на верификации характеристик систем и их эффективности.

**Ключевые слова:** микробиологическое загрязнение, микроклимат, система вентиляции, экологическая безопасность.

UDC 504.064.2

## Impact Assessment of the ventilation systems on microbiological safety and microclimatic conditions of premises

T. Kryvomaz<sup>1</sup>, D. Varavin<sup>2</sup>, R. Sipakov<sup>3</sup>, R. Kuzmishina<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sc.D, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [ecol@i.ua](mailto:ecol@i.ua),  
ORCID: 0000-0002-4161-9702

<sup>2</sup> Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [d.varavin@icloud.com](mailto:d.varavin@icloud.com),  
ORCID: 0000-0002-4161-9702

<sup>3</sup> Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [r.sipakov@icloud.com](mailto:r.sipakov@icloud.com),  
ORCID: 0000-0002-0862-5043

<sup>4</sup>Student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [kuzmishuna02raisa@gmail.com](mailto:kuzmishuna02raisa@gmail.com)

**Abstract.** *The critical aspects of the impact of microbiological contamination on ventilation and air conditioning systems, the microclimate of the premises, and human health are analyzed. The quantitative and qualitative composition of the microflora of premises depends on their functional purpose, design features, operating conditions, climate, and other factors, among which the method of ventilation is essential. The moisturizers in air conditioning system are hazardous, which provide bacteria and fungi with water necessary for their life and reproduction. In addition, contaminants accumulated in ventilation systems operate as a substrate for feeding microorganisms. Multi-story administrative, public and residential buildings, industrial buildings, and other places of mass concentration are areas of increased aerobiological risk of infection. In case of improper operation, air conditioning and ventilation systems can be sources of microorganisms in any room. Transmission of infectious aerosol over long distances occurs in rooms with poor ventilation, and a key factor for the outbreak of infection is the direction of airflows. In the context of the COVID-19 pandemic, organizations and international agencies to control the spread of SARS-CoV-2 indoors recommend limiting the operation of exhaust ventilation and recirculation systems. However, there is still insufficient data to clarify the role of heating, ventilation, and air conditioning systems in spreading infection. Risk assessment and decision-making on the choice of air conditioning systems should be dynamic and based on the scale of the pandemic and the verification of the characteristics of HVAC systems and their effectiveness.*

*Keywords: microbiological pollution, microclimate, ventilation system, environmental safety.*

Надійшла до редакції / Received 03.12.2020

Наукове видання

# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 35

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 27.12.2020. Формат 60×84 1/8  
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Умов. друк. арк. 6,75. обл. вид. арк. 7,10.  
Наклад 100 прим. Замовлення № 161404

Надруковано в ТОВ “Видавництво “Юстон”  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36-а т: (044) 360-22-66, [www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)  
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції серія дк № 797 від 09.09.2015 р.

НАДІЙНО  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНО



HERZ®



HERZ.UA