

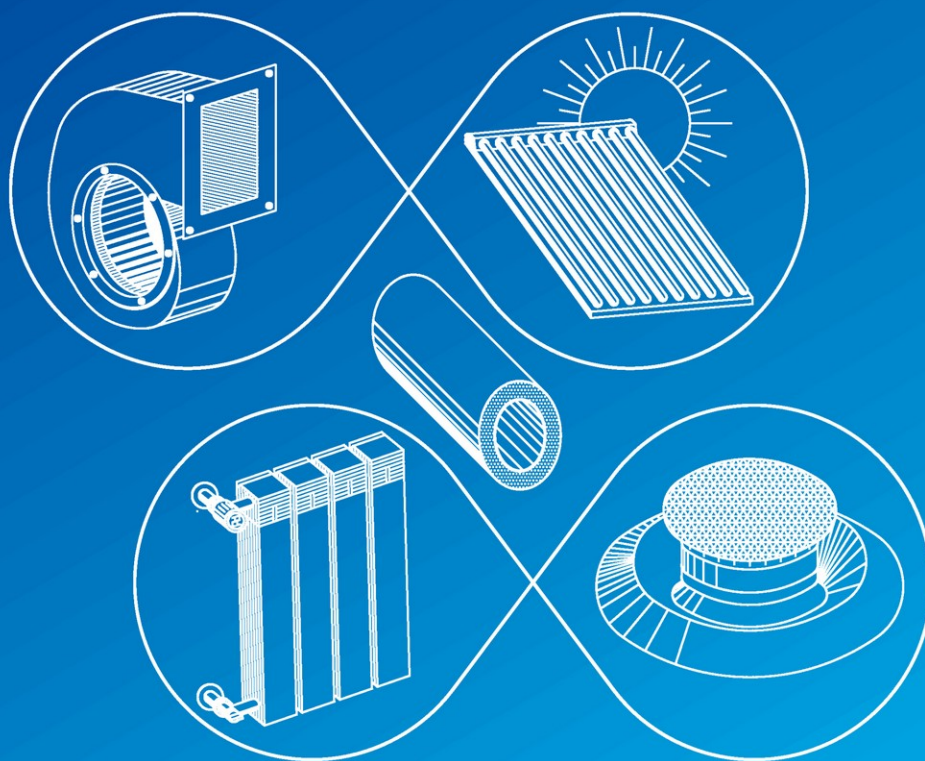
ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2019

Випуск 31

**70 років кафедрі
теплогазопостачання і вентиляції**



**Науково-практична конференція
Теорія і практика формування мікроклімату
та енергопостачання будівель і споруд
17-18 жовтня 2019 р.**

КИЇВ 2019

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

**VENTYLIATSIIA, OSVITLENNIA
TA TEPLOHAZOPOSTACHANNIA**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL COLLECTION

founded in 2001

ISSUE 31

Kyiv 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 31

Київ 2019

УДК 697

ISSN 2409-2606

B29

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 31 / відповідальний редактор В. Б. Довгалюк. – Київ: КНУБА, 2019. – 72 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: канд. техн. наук, професор В. Б. Довгалюк (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); канд. техн. наук, доцент В. О. Мілейковський (відповідальний секретар); докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Міхайленко; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; 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 29 листопада 2019 року, протокол № 28.

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</i>	5
О. Т. Возняк, В. Б. Довгалюк, І. Є. Сухолова, О. М. Довбуш <i>Математичне моделювання закрученої припливної струмини в змінному режимі із застосуванням різних моделей турбулентності</i>	6
Т. М. Ткаченко, В. О. Мілейковський, О. М. Гунченко <i>Оцінка заощадження енергії та непрямого зменшення викидів CO₂ вертикальним озелененням</i>	16
О. В. Задоянний <i>Обґрунтування поглибленого ексергоекономічного аналізу систем кондиціонування повітря</i>	24
Ю. Й. Франчук <i>Створення експертно-моделювальної системи для аналізу факторів, які впливають на якість природного газу</i>	33
Л. М. Коваль <i>Передумови і перспективи нормування штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини</i>	42
П. М. Гламаздін, П. О. Пасічник <i>Шляхи зниження тепловтрат у зарядіаторній ділянці огорожувальних конструкцій</i>	55
Ю. О. Поденежко, М. А. Кириченко, Н. В. Чепурна, В. В. Чепурний <i>Дослідження опалювальних приладів на основі фазового переходу першого роду</i>	63
<i>ДО 70-РІЧЧЯ КАФЕДРИ ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ І ВЕНТИЛЯЦІЇ</i>	71

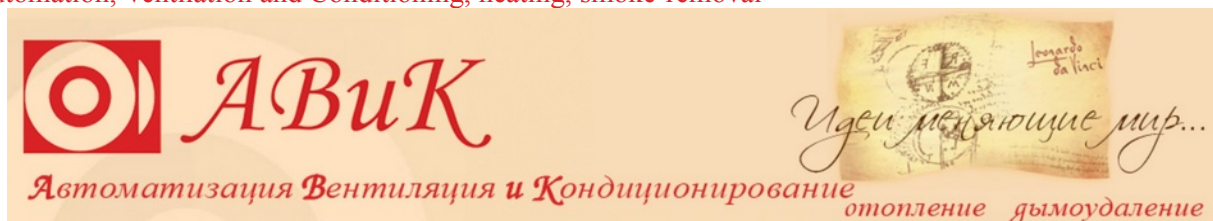
Спонсор випуску – ТОВ АВІК



CONTENTS

<i>Information for the Authors</i>	5
O. Vozniak, V. Dovhaliuk, I. Sukholova, O. Dovbush <i>Mathematical Simulation of a Twisted Inlet Jet at Variable Mode with Using Various Turbulence Models (in Ukrainian)</i>	6
T. Tkachenko, V. Mileikovskyi, O. Hunchenko <i>Assessment of energy savings and indirect reduction of CO₂ emissions by vertical gardening (in Ukrainian)</i>	16
O. Zadoiannyi <i>Grounding of in-depth exergoeconomic analysis of air conditioning systems (in Ukrainian)</i>	24
Yu. Franchuk <i>Creation of an Expert-Modelling System for the Analysis of Factors that Affect the Quality of Natural Gas (in Ukrainian)</i>	33
L. Koval <i>Prerequisites and Prospects for Establishing Regulations on Artificial Lighting Consistent with Human Biorhythms (in Ukrainian)</i>	42
P. Glamazdin, P. Pasichnyk <i>Ways to Reduce Heat Loss in the Radiator Section of the Building Envelope (in Ukrainian)</i>	55
Y. Podenezhko, M. Kirichenko, N. Chepurna, V. Chepurnyi <i>Study of Heating Devices Based on First-Order Phase Transition (in Ukrainian)</i>	63
<i>TO THE 70 TH ANNIVERSARY OF THE CHAIR OF HEAT GAS SUPPLY AND VENTILATION (in Ukrainian)</i>	71

The sponsor of this issue – AVIK LTD *Ideas, which change the world...*
Automation, Ventilation and Conditioning, heating, smoke-removal



До відома авторів

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

Продовжуємо публікацію статей за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика формування мікроклімату та енергопостачання будівель і споруд”, присвяченої 70-річчю кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури. Наприкінці випуску публікується історія кафедри.

У зв’язку з великою кількістю прийнятих доповідей вони публікуватимуться не лише в чотирьох випусках 2019 року, але також і у першому випуску 2020 року. Дякуємо всім учасникам конференції та рецензентам!

Звертаємо увагу на неухильне виконання вимог до рукописів, розміщених на сайтах

vothp.org.ua

vothp.knuba.edu.ua

Information for the Authors

Dear authors of articles of the Scientific and Technical Collection “Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplohazopostachannia” (“Ventilation, Illumination and Heat and Gas Supply”).

We continue publication of articles on the materials of the international scientific and practical conference "Theory and Practice of Microclimate Formation and Energy Supply of Buildings and Structures", dedicated to the 70-Th anniversary of the Department of Heat Gas Supply and Ventilation of Kiev National University of Construction and Architecture. At the end of the issue the history of the department is published

Because of the great number of accepted reports they will be published not only in the four issues of 2019 but in the first issue in 2020. Thanks for all participants of the conference and for the reviewers!

Pay attention to the strict adherence to the Requirements for manuscripts, placed on the sites

vothp.org.ua

vothp.knuba.edu.ua

УДК 697.922.565; 697.921.47

Математичне моделювання закрученої припливної струмини в змінному режимі із застосуванням різних моделей турбулентності

О. Т. Возняк¹, В. Б. Довгалюк², І. Є. Сухолова³, О. М. Довбуш⁴

¹Доктор технічних наук, доцент. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна, orest.voznyak@i.ua, ORCID: 0000-0002-6431-088X

²Кандидат технічних наук, професор. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Київський Національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2280170@ukr.net ORCID: 0000-0002-4836-5354

³Кандидат технічних наук, асистент. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна, isukholova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3319-2278

⁴Старший викладач. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна, dovbus.ol@gmail.com ORCID: 0000-0003-0272-6764

Анотація. Робота присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності розподілу повітря закрученими та настільними струминами повітря для забезпечення нормативних параметрів повітря в приміщеннях. Розроблено математичну модель подачі повітря закрученими та настільними повітряними струминами в приміщенні. Показано, що для досягнення максимальної ефективності розподілу повітря необхідно забезпечити подачу повітря струминами, які інтенсивно затухають перед входом до робочої зони. Моделювання потоку повітря здійснювалося за допомогою програми CFD Ansys FLUENT. Подано розв'язки за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта–Аллараса та $k-\epsilon$ моделі. Представлено графічні та аналітичні залежності на основі проведених експериментальних досліджень, які можуть бути використані в інженерних розрахунках. Визначено динамічні параметри повітряного потоку, що створюється завдяки закрученим та настільним повітряним струминам під час їхнього витікання у змінному режимі та формування динамічного мікроклімату в приміщенні. Наведено результати експериментальних досліджень подачі повітря в приміщення двострумним повітророзподільним пристроєм, що утворює закручену та настільну повітряні струмини для створення інтенсивнішої турбулізації припливного повітряного потоку. Отримані результати цих досліджень дають можливість здійснити інженерні розрахунки розподілу повітря закрученими та настільними струминами повітря.

Ключові слова: розподіл повітря, закручена струмина, настільна струмина, змінний режим, динамічний мікроклімат, швидкість повітря, швидкість потоку

Вступ. Ефективність роботи людини значною мірою залежить від того, як санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату відповідають фізіологічним потребам [1]. Стан повітряного середовища приміщення визначається температурою, відносною вологістю, швидкістю повітря, шумом, концентрацією пилу, наявністю запахів тощо. Для забезпечення нормованих параметрів повітряного середовища в робочій зоні приміщень необхідно, щоб розподіл припливного повітря був ефективним. Унаслідок цього способи та пристрої розподілу повітря суттєво впливають на техніко-економічні параметри системи забезпечення мікроклімату в цілому. Щоб вибрати спосіб розподілу повітря необхідно враховувати будівельні особливості приміщення, розташування та розмір джерел теплоти, вологи й шкідливих газів.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Аналіз літературних даних засвідчив, що вплив швидкості руху повітря на комфортний стан людини необхідно розглядати сукупно з температурою, відносною вологістю повітря, інтенсивністю турбулентності повітряних потоків, температурою поверхонь та термічним опором одягу [2, 3]. Проаналізовано

вплив змінного режиму подачі повітря на самопочуття людини та ефективність її праці [4, 5]. У виробничих приміщеннях для адаптації апарату терморегуляції, покращення самопочуття і зниження втомлюваності працівників, особливо за монотонного характеру роботи, гігієнічно обґрунтовано змінювати за періодичним законом один з параметрів, наприклад температуру чи швидкість руху повітря, тобто створювати динамічний мікроклімат [6]. Поряд із періодичною зміною продуктивності вентиляції змінюється за періодичним законом концентрація CO₂ у приміщенні [7, 8].

Розглянуто та проаналізовано схеми розподілу повітря, які найбільш доцільно застосовувати у приміщенні з урахуванням затухання припливних неізотермічних струмин. Обґрунтовано, що максимальної ефективності можна досягнути при використанні горизонтальних плоских струмин з ефектом їхнього настилення, а також вертикальні закручені потоки [9, 10]. Розроблено (рис. 1) двострумний пристрій розподілу повітря (ДСПР). Він створює закручений та настільний на плоску поверхню струмини повітря, що витікають у змінному режимі [9, 10] (рис. 1).

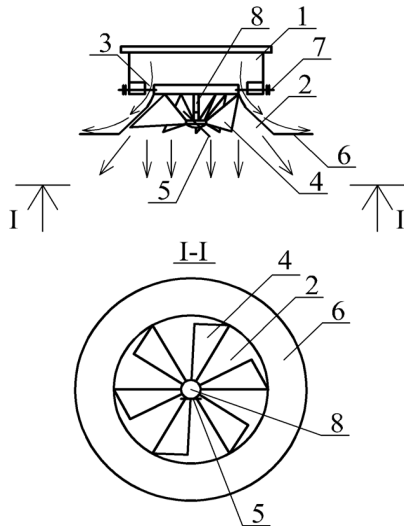


Рис. 1. Двострумний повітророзподільник із утворенням закрученої та плоскої настільної струмини: 1 – патрубок; 2 – дифузор; 3 – кільцева регульована щілина; 4 – пластини; 5 – ручка керування; 6 – відбійний козирок; 7 – гвинт регулювання щілини; 8 – стержень

Виконано чисельне моделювання струмини за моделями турбулентності $k-\epsilon$ і Спаларта-Аллмараса в нестационарному режимі [13-15].

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є удосконалити математичну модель припливної закрученої повітряної струмини з використанням моделі турбулентності Спаларта-Аллмараса та $k-\epsilon$ моделі у нестационарному режимі.

Основна частина. Розглянемо витікання потоку повітря в нестационарному режимі із ДСПР у вільний простір (рис. 1) [9, 10]. Осьова швидкість v_x у визначеній точці A з координатою x_A у випадку стаціонарного режиму визначається за відомою формулою розрахунку осьової швидкості v_0 , м/с [16].

$$v_x = v_0 m \frac{\sqrt{F_0}}{x}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

де m – коефіцієнт затухання швидкості струмини; F_0 – площа живого перерізу повітророзподільника, м^2 .

Приймається синусоїдальний закон зміни початкової швидкості

$$v_0 = v_{cep} + A \sin \omega \tau, \text{ м/с}, \quad (2)$$

де v_{cep} – середнє значення швидкості v_0 , м/с, за період коливань від мінімального v_{0min} , м/с, до мінімального v_{0max} , м/с, значення

$$v_{cep} = \frac{v_{0,max} + v_{0,min}}{2}, \text{ м/с}; \quad (3)$$

A – амплітуда коливань швидкості v_0 :

$$A = \frac{v_{0,max} - v_{0,min}}{2}, \text{ м/с}; \quad (4)$$

ω – циклічна (колова) частота коливань:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ с}^{-1}; \quad (5)$$

τ – проміжок часу, с; T – період коливань, с.

У початковий момент часу прийнято нейтральне положення пластин на рис. 1.

Аналогічно, можна записати вираз для коливання осьової швидкості з урахуванням залежності (5):

$$v_x = v_{x,cep} + B \sin \left(\frac{2\pi}{T} \tau - \phi \right), \text{ м/с}, \quad (6)$$

де B – амплітуда коливання осьової швидкості, м/с; ϕ – початкова фаза.

Оскільки осьова швидкість v_x запізнюється за фазою порівняно з v_0 , то початкова фаза надходить у вираз (6) з негативним знаком. Середні значення v_x , м/с, та амплітуда їхніх відхилень B , м/с, визначаються аналогічно формулам (3) та (4):

$$v_{x,cep} = \frac{v_{x,max} + v_{x,min}}{2}, \text{ м/с}; \quad (7)$$

$$B = \frac{v_{x,max} - v_{x,min}}{2}, \text{ м/с}. \quad (8)$$

З рівнянь (1-8) отримуємо:

$$\begin{aligned} & v_{x,cep} + B \sin(\omega \tau - \phi) = \\ & = v_{0,cep} \frac{m \sqrt{F_0}}{x} + A \frac{m \sqrt{F_0}}{x} \sin \omega \tau, \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оскільки постійний режим є частковим випадком нестационарного режиму з амплітудою коливань $A = 0$ і $B = 0$, то рівняння (9) набуває вигляду аналогічно формулі (1)

$$v_{x,cep} = v_{0,cep} m \frac{\sqrt{F_0}}{x}, \text{ м/с}. \quad (10)$$

За рівняннями (9) і (10), маємо:

$$B \sin\left(2\pi \frac{\tau}{T} - \phi\right) = A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \sin\left(2\pi \frac{\tau}{T}\right), \text{ м/с.} \quad (11)$$

З рівняння (11)

$$B = A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \frac{\sin\left(2\pi \frac{\tau}{T}\right)}{\sin\left(2\pi \frac{\tau}{T} - \phi\right)}, \text{ м/с.} \quad (12)$$

Амплітуда B відхилення осьової швидкості змінюється з часом, що відповідає динамічному мікроклімату. Визначимо початкову фазу ϕ початкової точки A (рис. 2). Для цього схематично розглянемо залежність середньої осьової швидкості $v_{x, \text{сеп}}$, м/с, від поточної координати x , м, і від часу τ , с, у початковій та основній ділянках повітряної струмини. Час τ_A , с, проходження елементарного об'єму повітря струмини від насадки до точки A з координатою x , м, буде початковим моментом часу аксіального коливання v_x , м/с:

$$\tau_A = \frac{x_A}{v}, \text{ с.} \quad (13)$$

Середня швидкість v , м/с, визначалася інтегруванням на проміжку основної ділянки струмини (14):

$$v = \frac{v_{0, \text{сеп}} x_{\text{поч}} + \int_{x_{\text{поч}}}^{x_A} \frac{v_0 m \sqrt{F_0}}{x} dx}{x_A}, \text{ м/с,} \quad (14)$$

де $x_{\text{поч}}$ – довжина початкової ділянки, м.

За формулою (14)

$$v = \frac{v_{0, \text{сеп}}}{x_A} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \ln \left(\frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \right), \text{ м/с.} \quad (15)$$

Отже, з урахуванням виразів (13) і (15) початковий момент часу:

$$\tau_A = \frac{x_A^2}{v_{0, \text{сеп}} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \ln \left(\frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \right)}, \text{ с.} \quad (16)$$

Початковий момент часу, с, за рівнянням

(16) – це час запізнення коливання осьової швидкості v_x , м/с, відносно початкової швидкості v_0 , м/с. Отже, початкова фаза ϕ з рівнянь (3) і (16):

$$\phi = \frac{2\pi x_A^2}{T v_{0, \text{сеп}} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \ln \left(\frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \right)}. \quad (17)$$

Всі значення, необхідні для обчислення змінної з часом осьової швидкості v_x , м/с, в точці A визначаються з двохфакторної залежності $\phi = f(x, \tau)$. При цьому швидкість $v_{x, \text{сеп}}$, м/с, розраховується за рівнянням (10), швидкість $v_{\text{сеп}}$, м/с, – за формулою (3), фаза ϕ – за залежністю (17), а амплітуда B – за рівнянням (12).

Експериментальні дослідження проводилися згідно з методикою [12] за таких умов та спрощень:

- припливний потік повітря усталений;
- повітряні струмини є ізотермічними;
- початкова швидкість повітря в насадку $v = 5 \dots 15$ м/с;
- період зміни швидкості під час експериментальних досліджень був сталим: $T = 960$ с (16 хв);
- витрата повітряного потоку $L = 200 \dots 500$ м³/год.

Швидкість повітря вимірювалася термоелектроанемометром Testo-405 з використанням координатного пристрою з мережею точок 5×5 см. Експериментальні результати подано на рис. 2.

Проведено чисельне моделювання потоку повітря в програмі CFD Ansys FLUENT [11].

Для моделювання в даній програмі було прийнято такі спрощення і припущення:

- повітря є нестисливим;
- потік повітря усталений;
- припливне повітря подавалося двоструминним повітророзподільником ДСПР із утворенням закрученої та плоскої настільної струмин;
- розглянуто розподіл лише повної швидкості в закрученій струмині без розкладання на складові (радіальну, аксіальну і тангенціальну).

Для виведення рівнянь руху вживаються закони збереження маси і енергії, а швидкість зміни трьох компонент імпульсу повинна дорівнювати відповідним компонентам прикладених сил. Рівняння нерозривності:

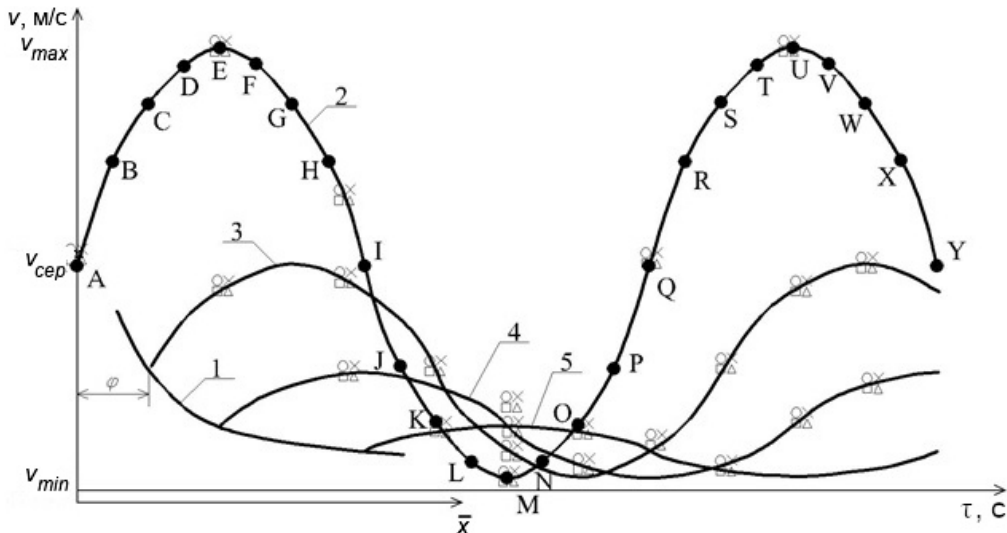


Рис. 2. Результати експерименту:

1 – залежність швидкості повітря від координати за усталеного режиму;
2, 3, 4, 5 – залежності швидкостей повітря від часу в різних координатах (змінний режим)

$$\frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3) = 0, \quad (18)$$

де x_i , – координати, м ($i = 1, 2, 3$); u_i – відповідні компоненти швидкості, м/с; ρ – густина повітря, кг/м³,

Для порівняння розглянуто дві моделі турбулентності: двохпараметричну k - ϵ модель та однопараметричну модель Спаларта-Аллмараса. Для цього проведено розрахунок системи рівнянь Нав'є-Стокса, усередненої за Рейнольдсом. Для замикання турбулентності визначено зв'язок між напруженнями за Рейнольдсом і параметрами усередненого потоку за вказаними моделями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_\ell}(\rho u_i u_\ell) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x_\ell}\left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_\ell}\right) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x_\ell}\left(\mu_e \frac{\partial u_\ell}{\partial x_i}\right) - g_i(\rho - \rho_0), \quad (19) \end{aligned}$$

де $j = 1 \dots 3$, $\ell = 1 \dots 3$, $i \neq j \neq \ell \neq i$, $\mu_e = \mu + \mu_t$ – загальна в'язкість, Па·с; μ – фізична в'язкість, Па·с; μ_t – турбулентна в'язкість, Па·с, g_i – проекція прискорення від зовнішніх масових сил (у даній задачі – тяжіння) на вісь x_i , ρ_0 – густина навколишнього повітря.

У пакеті Ansys FLUENT транспортні рівняння [17] здійснюваної k - ϵ моделі (*Realizable k- ϵ*

Model) для замикання рівнянь (18) і (19) мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \\ + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k; \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right) + \\ + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon; \quad (21) \end{aligned}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\epsilon}}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \quad \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \epsilon_{ij\ell} \omega_\ell,$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ij\ell} \omega_\ell, \quad A_s = \sqrt{6} \cos(\varphi),$$

$$\varphi = \arccos(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3},$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}$$

$$C_1 = \max\left(0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right), \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad (22)$$

де k – кінетична енергія турбулентності; ϵ – турбулентна дисипація; S – інваріант тензора деформацій; Y_M – внесок змінного розширення при турбулентності стиснення в зага-

льну швидкість дисипації; $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_2 = 1,9$, $C_{3\varepsilon}$, A_0 – дослідні константи, $\sigma_k = 1,0$ і $\sigma_\varepsilon = 1,2$ – турбулентні числа Прандтля для, відповідно, k та ε ; S_k , S_ε – користувацькі вихідні параметри (user-defined source terms), $\bar{\Omega}_{ij}$ – середній тензор швидкості обертання у обертовій опорній системі відліку з кутовою швидкістю ω_i ; $G_k = \mu_t S$ – продукування турбулентної кінетичної енергії, що утворюється від середніх градієнтів швидкості; $G_b = \beta g_i (\mu_t / Pr_t) (\partial \Theta / \partial x_i)$ – продукування кінетичної енергії силою виштовхування; β – коефіцієнт об’ємного розширення, Pr_t – турбулентне число Прандтля, яке прийняте 0,85, Θ – температура повітря, К.

Поряд з цим проведено аналогічний розрахунок за однопараметричною моделлю турбулентності Спаларта-Аллмараса [18], яка в пакеті Ansys FLUENT має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = G_v + \frac{\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right) + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2}{\sigma_{\tilde{v}}} - Y_v + S_{\tilde{v}}; \quad (23)$$

$$\mu_t = \rho \tilde{v} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{v}}{\nu},$$

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{v}, \quad \tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2},$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \quad U^* = \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}},$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$S = |\Omega_{ij}| + C_{prod} \min(0, |S_{ij}| - |\Omega_{ij}|),$$

$$|\Omega_{ij}| = \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad |S_{ij}| = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}{2},$$

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2, \quad f_w = \tilde{g} \left(\frac{1 + C_{w3}^6}{\tilde{g}^6 + C_{w3}^6} \right)^{\frac{1}{6}},$$

$$\tilde{g} = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}, \quad (24)$$

де $\sigma_{\tilde{v}} = 2/3$, $C_{b1} = 0,1355$, $C_{b2} = 0,622$, $\kappa = 0,4187$, $C_{prod} = 2,0$, $C_{v1} = 7,1$, $C_{w2} = 0,3$, $C_{w3} = 2,0$ – дослідні константи; $S_{\tilde{v}}$ – користувацькі вихідні параметри (user-defined source terms); ν – фізи-

чна кінематична в’язкість, m^2/s . G_v та Y_v – відповідно, продукування та деструкція турбулентної в’язкості в пристінному шарі через перепони та в’язке гальмування; d – відстань до стіни, м; S – скалярна міра тензора деформацій; S_{ij} – середня швидкість деформації.

Проведено комплексне 4D чисельне моделювання потоку повітря в приміщенні за змінного режиму. Удосконалено метод визначення динамічної зміни розподілу швидкості струмини залежно від часу та координат одночасно. Для вирішення цієї комплексної задачі запропоновано зобразити графік залежності початкової та осьової швидкості від координати та від часу спільно з двома осями абсцис: O_x – координата й O_t – час (рис. 2).

Епюри швидкості залежно від часу фіксувалися з певним його кроком від точки А до точки Q (початок та закінчення періоду коливань швидкості). На рис. 2 ці точки А, В, С тощо позначено з кроком часу в 1/16 періоду T, с: $\tau = T / 16 = 60$ с (1 хв.) Їм відповідає кінематичний ряд динамічної зміни розподілу швидкості тривалістю в повний період коливань, с, – від точки А до точки Q (рис. 3, 4). Осьова швидкість за різних координат залежно від часу (рис. 2, лінії 3, 4 і 5) показано на «стоп-кадрах» кінематичного ряду.

Комплексне 4D чисельне моделювання у змінному режимі проводилося за моделлю Спаларта-Аллмараса [14, 15] та k - ε моделлю (рис. 3...4). На рис. 3, 4 зображено характерні точки А, В, С і т. д. згідно з рис. 2 та динамічну зміну розподілу швидкості потоку повітря в перерізі ДСПР за змінного режиму.

Розглянуто подачу повітря закрученою і настільною струминами за різних кутів нахилу закручувальних пластин (30° та 60°) та моделей турбулентності. Повний період коливань швидкості завершується в точці Q. Максимум початкової швидкості під час витікання струмини в змінному режимі знаходиться в точці E, її номінальне значення – у точках A, I та Q, а мінімум – у точці M, що узгоджується з відповідними «стоп-кадрами» кінематичного ряду (рис. 3, 4).

Як бачимо з рис. 2, 3, 4, точка R на другому періоді гармонічних коливань початкової швидкості виходу припливної струмини з повітродіподільного пристрою відповідає точці B на першому періоді коливань.

Обидві моделі турбулентності (Спаларта-Аллмараса [14, 15] і k - ε модель) дають задовільну збіжність результатів розрахунку динамічної зміни епюр швидкості.

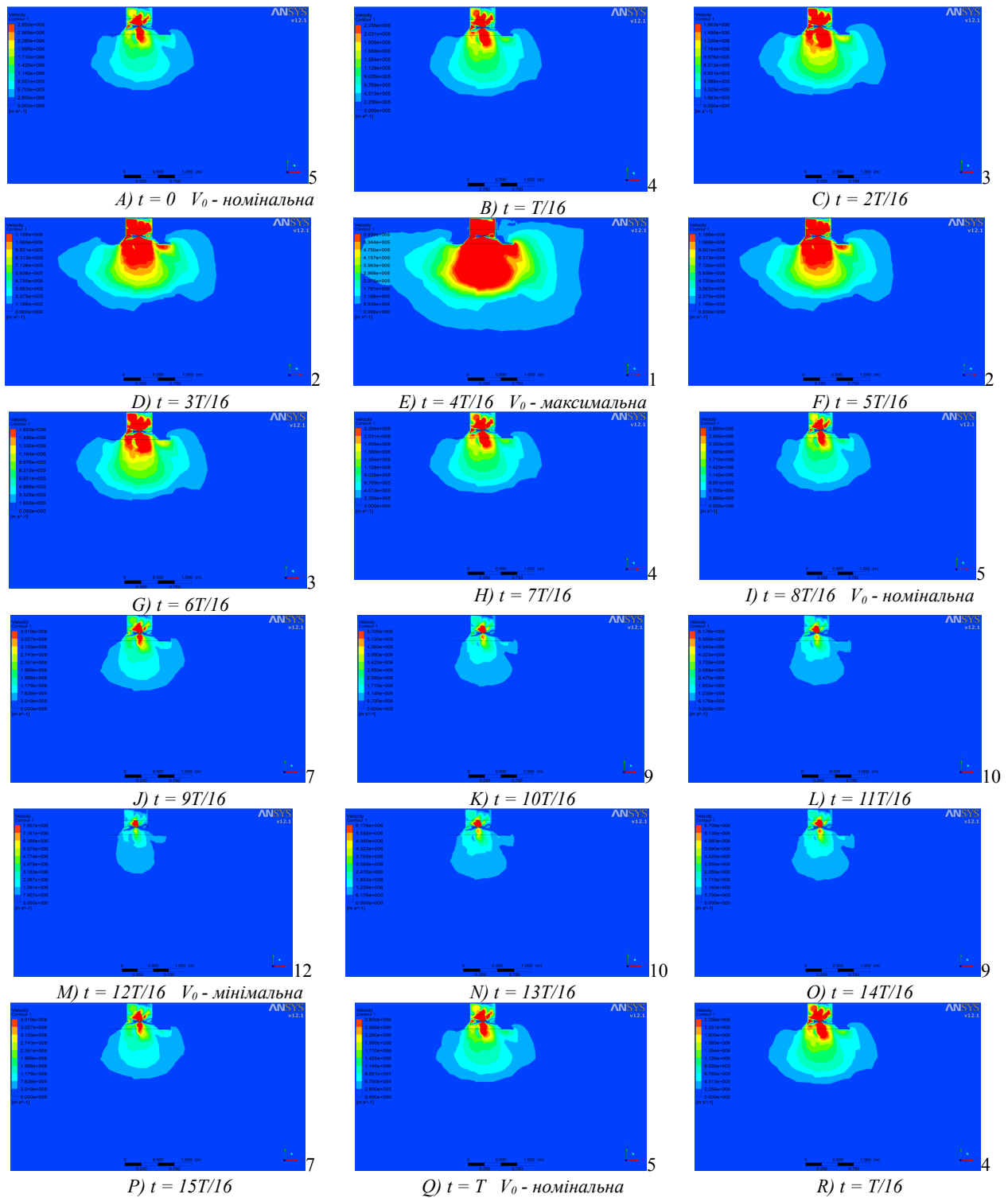


Рис. 3. Розподіл швидкостей за кута нахилу пластин 30° (k-ε модель)

Практичне значення результатів:

- результати теоретичних та експериментальних досліджень пристрою ДСПР, а також концепція проектування систем повітророзподілення в приміщеннях у нестационарному режимі, дозволяють ефективно реалізувати уточнену математичну модель у нестационарному режимі та забезпечити необхідні параметри мікроклімату в цих приміщеннях;
- робота має позитивні соціальні наслідки, оскільки призводить до покращення умов праці на робочих місцях і зменшення впливу технологічних процесів на професійні захворювання;
- підвищується енергоощадність системи завдяки створенню динамічного мікроклімату внаслідок періодичного зменшення витрати припливного повітря.

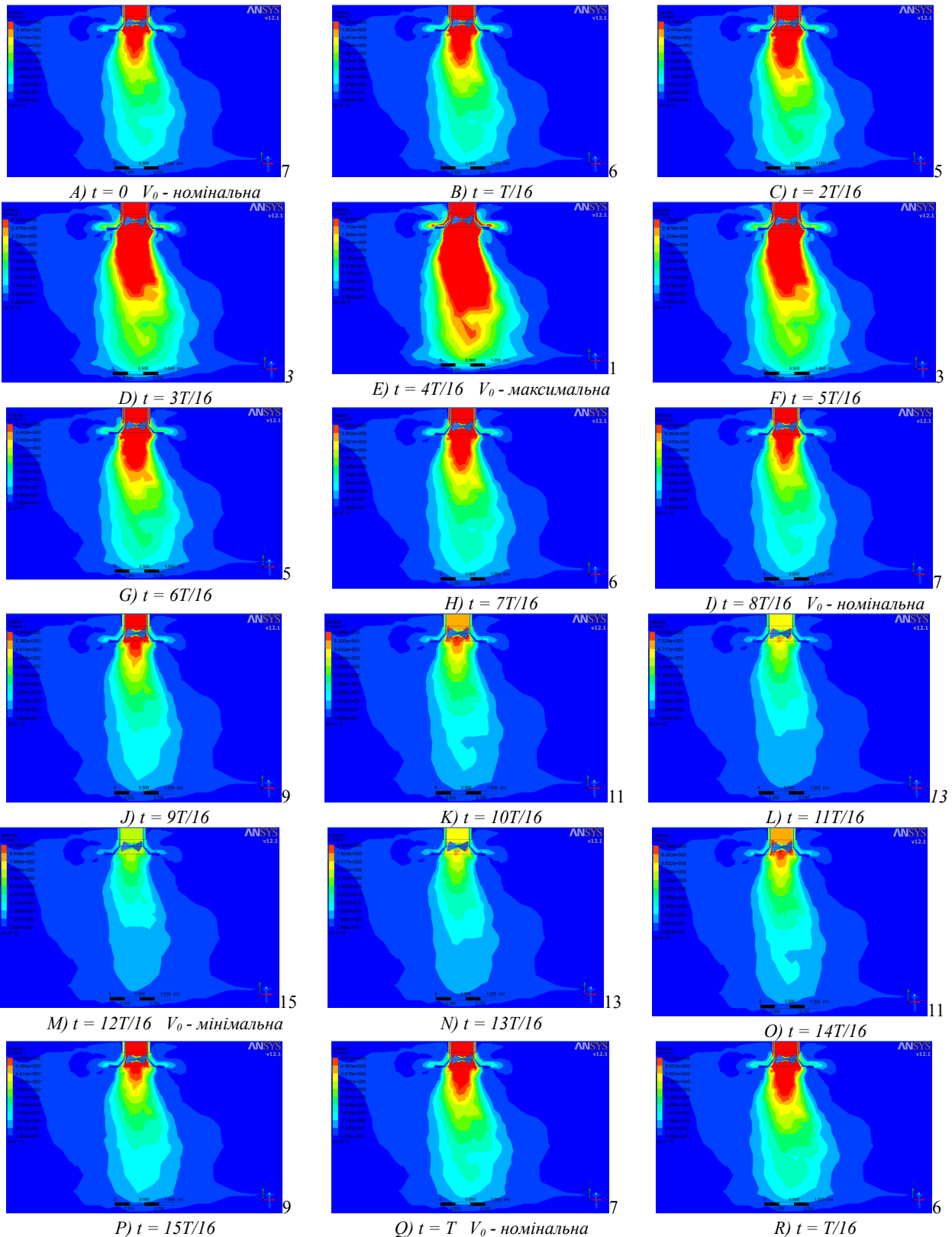


Рис. 4. Розподіл швидкостей за кута нахилу пластин 60° (k - ϵ модель)

Висновки. Запропонований двострумний повітророзподільник забезпечує інтенсивне затухання швидкості та динамічний мікроклімат у приміщенні. Отримано задовільну збіжність між результатами моделювання за k - ϵ

моделлю турбулентності та моделлю Спаларта-Аллмараса, що підтверджує можливість вживання обох моделей для розрахунку струмін від запропонованого повітророзподільника.

Література

1. Vozniak O. Influence of indoor climate on a person heat exchange in a room / O. Vozniak, O. Dovbush // *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej "Aktualne problemy budownictwa i Inzynierii srodowiska"*; czesc 2. – inzynieria srodowiska, Rzeszow. – 2000. – S. 441 – 447.
2. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини / О. Т. Возняк // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2010. – № 662. – С. 84 – 88.
3. Voznyak O. Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate / O. Voznyak, K. Myroniuk, O. Dovbush // *Proceedings: Selected scientific Papers 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference. Supplementary Iss. Technical University of Kosice*. – 2005. – P. 148 – 152.
4. Korbut V. Examining a device for air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets under alternating mode / V. Korbut, O. Voznyak, K. Myroniuk, I. Sukholova, P. Kapalo // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol 2, № 8 (86) – P. 30-38, ISSN 1729-3774. – <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96774>
5. Возняк О. Динамічний мікроклімат та енергоощадність / О. Возняк // *Вісник Нац. Ун-ту «Львівська політехніка», № 460 «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація»*. – 2010. – С. 150-153.
6. Voznyak O. Research of device for air distribution with swirl and spread air jets at variable mode / O. Voznyak, I. Sukholova, K. Myroniuk // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – Vol. 6/7 (78). – P.15-23. – <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56235>
7. Kapalo P. Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms / P. Kapalo, S. Vilcekova, O. Voznyak // *Chemical Engineering Transactions*. – Vol. 39. – 2014. – P. 1789-1794.
8. Kapalo P. Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode / P. Kapalo, O. Voznyak // *Czasopismo Inzynierii Ladowej, Srodowiska i Architektury*, tom XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015). – P. 201-210. – <http://doi.org/10.7862/rb.2015.189>
9. Возняк О. Т. Підвищення ефективності повітророзподілу у приміщенні при використанні закручених струмин / О. Т. Возняк, І. Є. Сухолова, Х. В. Миронюк // *MOTROL. Motorization and Power industry in agriculture*. – 2010. – Vol. 12. – С. 210-214.
10. Возняк О. Т. Повітророзподіл закрученими струминами у приміщеннях малого об'єму / О. Т. Возняк, І. Є. Сухолова, Х. В. Миронюк // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2011. – № 697. – С. 60- 63.
11. Возняк О. Т. Моделювання потоку повітря у виробничому приміщенні / О. Т. Возняк, Х. В. Миронюк, І. Є. Сухолова, О. М. Довбуш // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2015. – № 823. – С. 57-64.
12. Возняк О. Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у вентиляційній техніці: Монографія / О. Т. Возняк. – Львів: Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2010. – 220 с.
13. Korbut V. Modeling of supply air flow in a room at variable regime by using both k-ε and Spalart-Allmaras turbulent model / V. Korbut, O. Voznyak, I. Sukholova, K. Myroniuk // *SSP Journal of Civil Engineering. The Journal of TU of Kosice*. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 2. – P. 15-22. – <http://doi.org/10.1515/sspjce-2017-0014>
14. Возняк О. Т. Моделювання повітророзподілу в приміщенні у змінному режимі за допомогою моделі турбулентності Спаларта-Алмараса / Возняк О. Т., Сухолова І. Є. // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2016. – № 844. – С. 26-33.
15. Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. Моделювання потоку повітря у приміщенні в нестационарному режимі / Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2017. – № 877. – С. 25-32.
16. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – Санкт-Петербург.: "АВОК северо-запад", 2004. – 320 с.
17. 4.4 Standard, RNG, and Realizable k-ε Models / ANSYS inc. – Access Mode: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node57.htm>. – Accessed 01.10.2019.
18. 4.3 Spalart-Allmaras Model / ANSYS inc. – Access Mode: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node48.htm>. – Accessed 01.10.2019.

References

1. Vozniak O., Dovbush O. "Influence of indoor climate on a person heat exchange in a room." *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej "Aktualne problemy budownictwa i Inzynierii srodowiska"*; czesc 2 – inzynieria srodowiska, Rzeszow, 2000. P. 441-447.
2. Vozniak O. "Vplyv parametriv vnutrishnioho mikroklimatu prymishchennia na teploobmin liudyny." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2010. № 662. P. 84-88.
3. Vozniak, Myroniuk K., Dovbush O. "Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate." *Proceedings: Selected scientific Papers 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference. 2005*. Supplementary Iss. Technical University of Kosice. P. 148-152.
4. Korbut V., Vozniak O., Myroniuk K., Sukholova I., Kapalo P. "Examining a device for air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets under alternating mode." *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, № 8 (86), 2017. P. 30-38.5. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96774>

5. Vozniak O. "Dynamichniy mikroklimat ta energooshchadnist." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2010. №460 «Теплоенергетика. Інженерія докількія. Автоматизація». P. 150-153.
6. Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Research of device for air distribution with swirl and spread air jets at variable mode." *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6/7 (78), 2015. P. 15-23. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56235>
7. Kapalo P., Vilcekova S., Vozniak O. "Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms." *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 39, 2014. P. 1789-1794.
8. Kapalo P., Vozniak O. T. "Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode." *Czasopismo Inzynierii Ladowej, Srodowiska i Architektury*. T. XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015). P. 201-210. <http://doi.org/10.7862/rb.2015.189>
9. Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Pidvyschennia efektyvnosti povitrorozpodilu u prymishchenni pry vykorystanni zakrucheneykh strumyn." *MOTROL. Motorization and Power industry in agriculture*". 2010. Vol. 12. P. 210-214.
10. Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Povitrorozpodil zakruchenymy strumynamy u prymishchenni maloho obiemu." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2011. № 697. P. 60-63.
11. O. Vozniak, K. Myroniuk, I. Sukholova, O. Dovbush. Modeliuvannia potoku povitria u vyrobnychomu prymishchenni // *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2015. № 823. P. 57-64.
12. Vozniak O. T. *Planuvannia eksperymentu ta optymizatsiia vyrishennia u ventyliatsiyii tekhnitsi*. Natsionalnyi Universytet "Lvivska politehnika", 2010.
13. Korbut V., Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Modeling of supply air flow in a room at variable regime by using both k-ε and Spalart-Allmaras turbulent model." *SSP Journal of Civil Engineering. The Journal of TU of Kosice*. 2017. Vol. 12. Iss. 2. P.15-22. <http://doi.org/10.1515/sspjce-2017-0014>
14. Vozniak O. T., Sukholova I. Ye. "Modeliuvannia povitrorozpodilu v prymishchenni u zminnomu rezhymi za dopomohoiu modeli turbulentsnosti Spalarta-Allmarasa." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2016. № 844. P. 26-33.
15. Voznyak O. T., Sukholova I., Ye, Myroniuk K., V. "Modeliuvannia potoku povitria u prymishchenni v nestatsionarnomu rezhymi." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2017. № 877. P.25-32.
16. Grimitlin M. I. *Raspreделение vozduha v pomesheniiah*. AVOK severo-zapad, 2004. 320 p.
17. 4.4 Standard, RNG, and Realizable k-ε Models. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node57.htm>.
18. 4.3 Spalart-Allmaras Model. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node48.htm>.

УДК 697.922.565; 697.921.47

Математическое моделирование закрученной приточной струи с переменным режимом с использованием различных моделей турбулентности

О. Т. Возняк¹, В. Б. Довгалюк², И. Е. Сухолова³, О. М. Довбуш⁴

¹д.т.н., проф. Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, orest.voznyak@i.ua ORCID: 0000-0002-6431-088X

²к.т.н., проф. Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции. Киевський Національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2280170@ukr.net ORCID: 0000-0002-4836-5354

³к.т.н., ассист. Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, isukholova@gmail.com ORCID: 0000-0002-3319-2278

⁴ст. преп. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, dovbush.ol@gmail.com ORCID: 0000-0003-0272-6764

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности воздушораспределения закрученными и настилающимися струями для обеспечения нормируемых параметров воздуха в помещениях. Разработана математическая модель подачи воздуха закрученными и настилающимися струями в этих помещениях. Показано, что для достижения максимальной эффективности воздушораспределения необходимо подавать воздух струями, интенсивно затухающими ещё до входа в рабочую зону. Моделирование потока воздуха осуществлялось с помощью программы CFD Ansys FLUENT. Подано решения как по однопараметрической модели турбулентности Спаларта-Аллмараса, так и к-ε модели. Построены графические и выведены аналитические зависимости на основе проведённых экспериментальных исследований, которые могут быть использованы в последующих инженерных расчётах. Определены динамические параметры воздушного потока, создаваемого закрученными и настилающимися воздушными струями в переменном режиме и формирования динамического микроклимата в помещении. Приведены результаты экспериментальных исследований подачи воздуха в помещение двухпоточковым воздухом.

распределителем, образующим закрученные и настиляющиеся воздушные струи для создания интенсивной турбулентности приточного воздушного потока.

Ключевые слова: распределение воздуха, закрученный поток, настиляющаяся струя, переменный режим, динамический микроклимат, скорость воздуха, скорость потока.

UDC 697.922.565; 697.921.47

Mathematical Simulation of a Twisted Inlet Jet at Variable Mode with Using Various Turbulence Models

O. Vozniak¹, V. Dovhaliuk², I. Sukholova³, O. Dovbush⁴

¹Sc.D, Associate Professor. Institute of Civil and Environmental Engineering, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, orest.voznyak@i.ua ORCID:0000-0002-6431-088X

²PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine, 2280170@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4836-5354

³PhD, assistant professor. Institute of Civil and Environmental Engineering, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, isukholova@gmail.com ORCID: 0000-0002-3319-2278

⁴Senior Lecturer, Institute of Civil and Environmental Engineering, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, dovbush.ol@gmail.com ORCID: 0000-0003-0272-6764

Abstract. The article is devoted to the solution of actual task – the efficiency increasing of the air distribution using twisted and wall air jets to provide normative air parameters in premises. The purpose of the paper is to determine the characteristics of air flow that is formed by twisted and flat wall jets at alternating air flow and to obtain analytic equations for determining of needed dynamic parameters of the air jets, and also to design the mathematical model of incoming air flow at the alternating air flow. The mathematical model of air supply with twisted and wall air jets is improved. It is shown that for reaching the maximal efficiency of air distribution it is necessary to supply air by jets that intensively decay before entering into a working zone. Simulation of air flow was carried out using the computational fluid dynamic software Ansys FLUENT. Simulation of the flow are carried out by one-parameter Spalart-Allmaras turbulence model and two-parameter $k-\epsilon$ turbulence model. Good coincidence between the results of simulation using both turbulence models is obtained. The graphical and the analytical dependences on the basis of the conducted experimental research, which can be used in subsequent engineering calculations, are shown. Dynamic parameters of air flow that is formed by the twisted and wall air jets at alternating air flow has been determined. New 4D method of researches is proposed for researching of jets with alternating parameters of the air. Results of experimental investigations of air supply into the room by air distribution device which creates twisted air jets for obtaining more intensive turbulization of air flow in the room are presented. Obtained results of these investigations give possibility to realize engineering calculations of air distribution with twisted and wall air jets.

Keywords: air distribution, twisted jet, wall jet, variable mode, dynamic microclimate, air velocity, flow rate.

Надійшла до редакції / Received 10.07.2019.

УДК 536.2:620.9:502

Оцінка заощадження енергії та непрямого зменшення викидів CO₂ вертикальним озелененням

Т. М. Ткаченко¹, В. О. Мілейковський², О. М. Гунченко³

¹д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID:0000-0003-2105-5951

²к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, v_mil@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8543-1800

³к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, gunchenko.oksana@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5769-2496

*Анотація. У дослідженні розглянуто формування передумов сталого розвитку з урахуванням фактора безпеки. Завдяки впровадженню технологій «зеленого будівництва» створюються передумови для підвищення безпеки людини в умовах урбанізованого середовища як на етапі виробничого процесу (від виготовлення будівельних матеріалів до їхньої утилізації та під час виконання будівельних робіт) так і під час експлуатації вже збудованих об'єктів. Показано, що одним із дієвих способів підвищення комфорту й безпеки у будівельній галузі та у будь-якому урбанізованому середовищі є вертикальне озеленення будівель. Проведені в попередній роботі натурні дослідження «охолоджувального ефекту» вертикального озеленення будівель показали підвищений охолоджувальний ефект порівняно з горизонтальним озелененням. При штилі озеленення диким виноградом (*Parthenocissus*) значення «охолоджувального ефекту» становить 1,23 К. З урахуванням цього значення внесено поправки у формулу для визначення залежності охолоджувального ефекту від швидкості вітру. Розраховано заощадження енергії та непряме зменшення викидів CO₂ від охолоджувального ефекту вертикального озеленення для різних видів палива в теплий період року. Отримані результати показують доцільність використання вертикального озеленення для підвищення енергоефективності будівель та зменшення викиду парникових газів на теплогенераторах.*

Ключові слова: сталий розвиток, безпека, зелена конструкція, зелене будівництво, вертикальне озеленення, енергоефективність, парникові гази.

Вступ. Одним з негативних факторів індустріальної концепції розвитку є створення передумов для формування нових типів ризику та форм його проявлення і впливу на людину, довкілля та матеріальні цінності. Нові форми ризиків стимулюють розробку відповідних стратегій захисту та вдосконалення інформаційної підтримки при впровадженні цих стратегій. Лавиноподібне зростання економічних, соціальних та екологічних викликів потребує переходу від постфакторного реагування до передбачення та контрфакторного застереження з розробкою уніфікованих інтегрованих систем управління та стандартів мінімальної безпеки.

При застосуванні такої стратегії управління реалізація ідентифікованих ризиків зведена до контрольованих рівнів, близьких до мінімуму, але не унеможливує виникнення нових ризиків у далекому майбутньому [1]. Теперішні покоління не знають пріоритетів їхніх нащадків, але повинні надати їм можливість скористатися нагодою вибору. Тому концепція сталого розвитку ґрунтується на вимогах підвищення рівня безпеки (рис. 1) у всіх сферах життя та діяльності людини, який є цементувальною базою для поєднання основних формувальних векторів стійкого розвитку. Перед сучасним ви-

робником стоїть задача виготовлення якісної продукції. При цьому слід забезпечити таку організацію виробництва, яка не шкодить природному середовищу та створює всі умови для збереження життя, здоров'я й працездатності людей які беруть участь у виготовленні продукції та можуть потрапити в зону впливу виробничих потужностей або використовують вироблену продукцію.

Загальна ідея концепції сталого розвитку полягає в необхідності досягти балансу між сучасними потребами людства і захистом інтересів майбутніх поколінь. Безумовно, що ця мета також потребує збереження безпечного та здорового довкілля як запоруки створення сприятливих умов для появи та розвитку наступних поколінь.

У 2015 році в Україні підписано указ про прийняття Стратегії сталого розвитку «Україна-2020» [2]. Метою є впровадження європейських стандартів життя та вихід України на провідні позиції у світі. Мета реалізації Стратегії здійснюється за чотирма векторами: розвитку, безпеки, відповідальності та гордості. Однією зі складових вектора розвитку (рис. 1) є програма енергоефективності, а вектора безпеки – програма збереження навколишнього природного середовища.



Рис. 1. Складові формування передумов сталого розвитку з урахуванням фактору безпеки

Реалізації Стратегії сталого розвитку також сприяє впровадження принципів соціальної відповідальності бізнесу за міжнародним стандартом SA 8000, та прийнятий нещодавно ISO 45001, який дає новий поштовх до удосконалення системи управління професійною безпекою та здоров'ям.

Зазначені стратегії управління у сучасних умовах не є обов'язковими до виконання та застосовуються на добровільному принципі впровадження. Однак, кожен відповідальний роботодавець розуміє, що реалізація цих принципів у виробництво є запорукою не тільки сталого розвитку суспільства, а і його економічного зростання в майбутньому.

Актуальність дослідження. Будівельна галузь є значним важелем розвитку економіки держави. Вона має можливості швидкого впровадження нових технологій. На сьогодні, ця галузь має перспективи ефективного перетворення з енергомісткої, екологічно небезпечної та економічно нестабільної в галузь з екологічно свідомим поглядом на виробництво, використання та утилізацію. Сьогодні в Україні широко використовують технології будівництва у яких матеріали для утеплення зовнішніх стін будівель дозволяють досить ефективно та швидко досягти показників енергоефективності бу-

дівлі, але не є достатньо екологічними.

Для промислових об'єктів гостро стоїть питання викидів небезпечних хімічних речовин і парникових газів у повітря та способи їхнього зменшення, нейтралізації їхнього впливу на людину та довкілля.

Для великих міст, де щільна забудова у житловому секторі стикається з наявністю промислових об'єктів з різним ступенем впливу на довкілля та підвищенням екологічно небезпечного транспортного навантаження, одним з шляхів сталого розвитку є впровадження технологій «зеленого будівництва».

«Зелене будівництво» – це стратегія, яка відповідає принципам сталого розвитку. Вона дозволяє наповнювати економіку фінансовими потоками завдяки створенню умов для майбутнього безпечного та комфортного існування людини, особливо в межах урбанізованого середовища під сильним техногенним впливом. Це вигідно державі, яка отримує прибуток через надходження податків від підприємств будівельної галузі. Власники будівельних компаній отримують більші прибутки від використання екологічно чистих матеріалів і дружніх до довкілля та людини технологій. Знижуються ризики отримання професійних захворювань робітниками цієї галузі через ви-

користання безпечних матеріалів. Кінцеві споживачі отримують значні переваги через більш безпечне повітряне середовище, зниження енергоспоживання завдяки «охолоджувальному ефекту» рослин у теплий період року та додатковій теплоізоляції. Таким чином, зелене будівництво доцільне для всіх, хто створює та буде прямо чи опосередковано користуватися збудованими об'єктами.

Надалі розглянемо перспективи підвищення енергоефективності будівель завдяки «охолоджувальному ефекту» рослин.

Останні дослідження та публікації. У національній доповіді «Цілі Сталого Розвитку: Україна» (2017 р.) [3] йдеться про 17 цілей, одинадцять з котрих орієнтована на підвищення безпеки урбанізованих територій. Однак, серед науковців лунають як оптимістичні та ґрунтовні погляди на проблематику [4] так і скептичні гасла, які стверджують що Україна не має концепції і Стратегії сталого розвитку [5].

Така палітра висловлювань обумовлена складністю проблеми поєднання трьох основних векторів впливу на сталість розвитку (рис. 1).

Підвищення енергоефективності формування мікроклімату будівель та зменшення викидів парникових газів на сьогодні є одним з головних завдань розвитку будівельної галузі, а використання для цього біотехнічних технологій має на відміну від інших методів лише позитивний вплив на навколишнє середовище.

Більшість енергоефективних рішень, серед яких теплоізоляція фасадів, модернізація інженерних систем, сонячна та вітрова енергетика, використовують матеріали і речовини, які важко розкладаються в навколишньому середовищі. Тому особливу увагу слід приділяти технологіям, які мають мінімальний негативний вплив на довкілля. Серед цих заходів слід виділити зелені конструкції, поєднані з живими рослинами. Вони є біотехнічним засобом, що створює лише позитивний вплив: поглинання діоксиду вуглецю, генерація кисню, підтримання та примноження біорізноманіття тощо. Енергоефективність будівлі в теплий період року підвищується за рахунок «охолоджувального ефекту» рослин.

Як показали авторські лабораторні дослідження [6] в аеродинамічній трубі (рис. 2), горизонтальне озеленення даху з райграсу пасовищного (*Lolium perenne*) дає охолоджувальний ефект на 0,6...1,35 К при штилі (середнє значення – 0,752 К) зі значним зростанням ефекту при збільшенні швидкості руху повітря v , м/с.

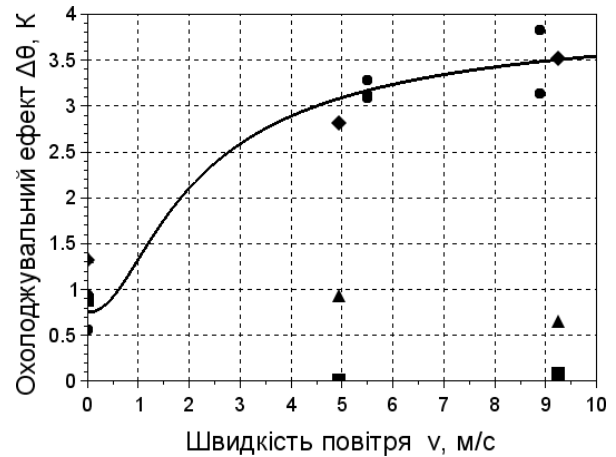


Рис. 2. Результати дослідження [7] охолоджувального ефекту райграсу пасовищного (*Lolium perenne*) в аеродинамічній трубі залежно від швидкості повітря: ● – висота трави 40 і 123 мм, різні точки; ▲ – висота трави 399 мм, навколо центру моделі; ■ – висота трави 399 мм, кут з навітряного боку; ◆ – висота трави 399 мм, кут з завітряного боку

Апроксимація отриманих значень дає формулу [7]:

$$\Delta\theta_{c.e.} = (0,508 \arctg(v) + 0,543) \arctg^2(v) + 0,752, \text{ К.} \quad (1)$$

Під охолоджувальним ефектом $\Delta\theta_{c.e.}$, К, розуміється зниження температури, К, безпосередньо під рослинами порівняно з температурою навколишнього середовища, К.

Проведені натурні дослідження охолоджувального ефекту вертикального озеленення диким виноградом (*Parthenocissus*) показали [8] більший охолоджувальний ефект – 1,1 ... 1,5 К (у середньому 1,23 К).

Це дозволяє на даному етапі внести поправки у формулу (1), а також визначити заощадження енергії на охолодження будівлі та непрямі зменшення викидів CO_2 (на джерелі теплоти).

Формулювання цілей статті. Метою роботи є коригування залежності «охолоджувального ефекту» вертикального озеленення будівель, визначення заощадження енергії від охолоджувального ефекту та непрямого зменшення викидів CO_2 .

Основна частина. По-перше, скоригуємо формулу (1) для вертикального озеленення диким виноградом (*Parthenocissus*). При штилі охолоджувальний ефект зростає порівняно з горизонтальним озелененням райграсом пасовищним (*Lolium perenne*) на

$$1,23 - 0,752 = 0,478 \text{ К}$$

або в

$$1,23 / 0,752 = 1,64 \text{ рази.}$$

Якщо вважати приблизно постійним відношення охолоджувального ефекту, то при швидкості повітря 5 м/с формула (1) даватиме охолоджувальний ефект райграсу пасовищного 3,09 К, а для дикого винограду отримаємо охолоджувальний ефект $3,09 \cdot 1,64 = 5,06$ К. При швидкості 10 м/с матимемо $3,54 \cdot 1,64 = 5,80$ К. Такі великі значення охолоджувального ефекту мало ймовірні. Тому приймаємо на даному етапі приблизно постійну різницю охолоджувального ефекту. Тоді формула (1) набуде вигляду (рис. 3):

$$\Delta\theta_{c.e.} = (0,508 \operatorname{atan}(v) + 0,543) \operatorname{atan}^2(v) + 1,23, \text{ К.} \quad (2)$$

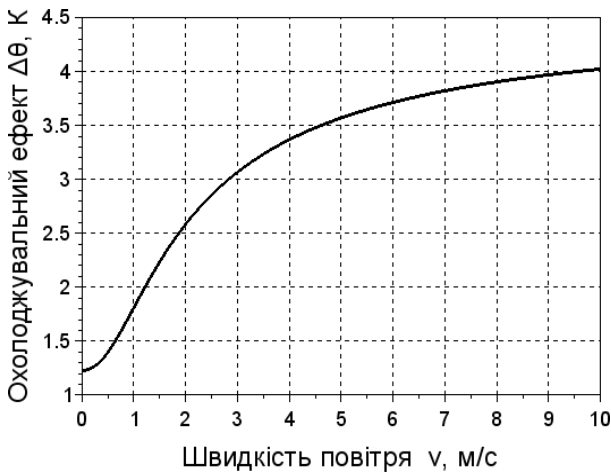


Рис. 3. Оцінка охолоджувального ефекту дикого винограду (*Parthenocissus*)

Оцінимо непряме зменшення викидів CO_2 вертикальним озелененням за рахунок «охолоджувального ефекту» в період охолодження аналогічно роботі [7] з використанням методики В. Н. Білоусова [9] для м. Києва. Непрямим названо [7] зменшення викидів через зменшення витрати палива на джерелі енергії завдяки підвищенню енергоефективності будівлі на відміну від прямого поглинання CO_2 рослинами завдяки фотосинтезу.

Термічний опір R , $m^2 K / \text{Вт}$ стін (без урахування озеленення) прийнято аналогічно роботі [7] від 0 до 10. Середній холодильний коефіцієнт холодильних машин у системах охолодження повітря будівлі прийнято $\epsilon = 4$. Частка електроенергії, що отримується при використанні палива, прийнято $\eta = 0,3$. Розрахунки виконані для [7]:

- вугілля з нижчою робочою теплою

згоряння $Q_i = 17,62$ МДж/кг та коефіцієнтом емісії $CO_2 k_c = 25,58$ [9];

- газу з нижчою робочою теплою згоряння $Q_i = 34,78$ МДж/кг та коефіцієнтом емісії $CO_2 k_c = 15,04$ [9].

Ступінь повного окислення вуглецю до CO_2 $k_{CO_2} = 3,67$ [9]. Теплий період року вважається таким, що триває в середньому $N = 120$ днів [7]. Швидкість вітру v , м/с та його повторюваність (без урахування шторму) n , % прийняті згідно з ДСТУ – Н Б В.1.1 – 27:2010 [10]. Також враховано шторм з повторюваністю n_0 , %.

Результати (табл. 1) при мінімальному термічному опорі стін [11] ($3,3 m^2 K / \text{Вт}$) показують суттєво більшу за райграс пасовищний (*Lolium perenne*) економію енергії та зменшення викиду CO_2 . Збільшення теплоізоляції (рис. 4, 5) зменшує вплив озеленення, однак, ефект залишається значущим, як і для райграсу пасовищного (*Lolium perenne*) [7] на відміну від даних [12].

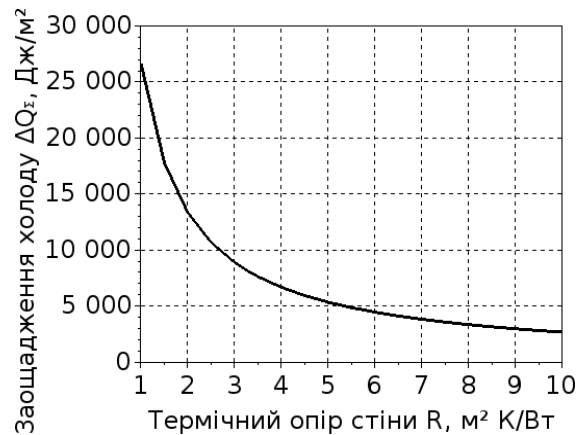


Рис. 4. Залежність заощадження холоду, Дж/м², через охолоджувальний ефект дикого винограду (*Parthenocissus*) від термічного опору стіни, м² К/Вт

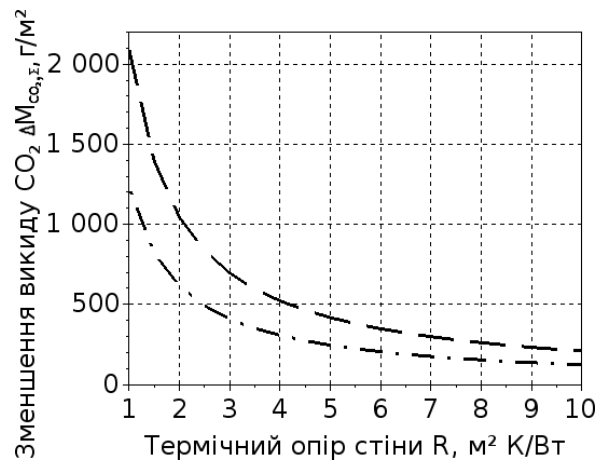


Рис. 5. Залежність заощадження холоду, Дж/м², через охолоджувальний ефект дикого винограду (*Parthenocissus*) від термічного опору стіни, м² К/Вт

Таким чином, вертикальне озеленення є доцільним і безпечним засобом підвищення енергоефективності будівель. Для озеленення першого-п'ятого поверхів воно вимагає мінімуму капітальних вкладень. Ампельні рослини висаджуються у відкритий ґрунт на відстані 0,3...0,5 м від стіни будівлі. Для більш високих поверхів необхідне терасове озеленення.

Висновки. Зелене будівництво в рамках концепції сталого розвитку є ефективним засобом підвищення безпеки та здоров'я людей на всіх етапах існування будівель і споруд. Від його впровадження користь отримують усі, хто прямо або опосередковано опиняються під впливом таких будівель або споруд. Однією з переваг даного підходу є підвищення енергоефективності будівель завдяки охоло-

джувальному ефекту рослин на "зелених конструкціях". Отримана залежність охолоджувального ефекту вертикального озеленення дикийм виноградом (*Parthenocissus*) від швидкості вітру дозволяє визначати заощадження енергії в період охолодження. Заощадження холоду від стіни з мінімальним опором теплопередачі $3,3 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ становить 8083 Дж/м^2 . Непряме (на джерелі енергії) зменшення викиду CO_2 при спалюванні вугілля становить 632 г/м^2 , а для газу – 372 г/м^2 . Це показує доцільність вертикального озеленення будівель, яке крім того вимагає мінімальних капітальних вкладень.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому буде виконано дослідження охолоджувального ефекту вертикального озеленення при штучному обдуві з різною швидкістю.

Таблиця 1

Розрахунок зменшення викиду CO_2 для вертикального озеленення стіни з мінімальним опором теплопередачі ($3,3 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$) у м. Києві при використанні вугілля (газу)

Напрямок вітру	Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗх	Зх	ПнЗх	Штиль	Середнє	Σ
Розрахунок за липень (31 доба)											
Швидкість вітру v , м/с	2,7	2,1	1,6	1,8	2,1	2,3	2,1	2,4	0	2,03	—
Повторюваність вітру без штилю, п, %	18,0	9,1	4,8	8,0	11,3	10,4	20,4	18,0	—	—	100
Повторюваність вітру зі штилем $P = p(1 - 0,01n_{штилю})$, %	16,34	8,26	4,36	7,26	10,26	9,44	18,52	16,34	9,2	—	100
«Охолоджувальний ефект» $\Delta\theta_{с.е.}$, °С	2,9 2,5	2,6 2,2	2,3 1,8	2,5 2,0	2,6 2,2	2,8 2,3	2,6 2,2	2,8 2,3	1,2 0,8	2,57 2,09	—
Заощадження холоду $\Delta\phi = U\Delta T_{с.е.}$, Вт/м ²	0,893 0,411	0,801 0,361	0,701 0,306	0,744 0,330	0,801 0,361	0,835 0,380	0,801 0,361	0,851 0,388	0,373 0,125	—	—
Заощадження холоду $\Delta Q = 3600 \cdot 24 \cdot 31 \times (P/100)\Delta\phi$, Дж/м ²	391 180	177 80	82 36	145 64	220 99	211 96	398 179	372 170	92 31	—	2088 935
Зменшення роботи компресора на 1 м ² конструкції $\Delta A = \Delta Q/\varepsilon$, кДж/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	522 234
Заощадження теплової енергії на 1 м ² конструкції $\Delta Q_f = \Delta A/\eta_{el}$, кДж/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1740 779
Заощадження палива на квадратний метр конструкції $\Delta B = 10^{-6} \Delta Q_f/Q_f^*$, кг/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,099 (0,050) 0,044 (0,022)
Зменшення викиду CO_2 на квадратний метр конструкції $\Delta M_{\text{CO}_2} = \Delta B Q_f^* k_c k_{\text{CO}_2}$, г/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	163,4 (96,1) 73,2 (43,0)
Розрахунок за теплий період року											
Заощадження холоду, $\Delta Q_{\Sigma} = \Delta Q N/31$, Дж/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8083 3620
Зменшення роботи компресора на квадратний метр конструкції $\Delta A = \Delta A N/31$, Дж/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2021 905
Зменшення викиду CO_2 на квадратний метр конструкції $\Delta M_{\text{CO}_2, \Sigma} \approx \Delta M_{\text{CO}_2} N/31$, г/м ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	632 (372) 283 (167)

Примітка. Косим шрифтом виділено відповідні дані для озеленення райграсом пасовищним (*Lolium perenne*) покривлі з мінімальним опором теплопередачі ($6 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$).

Література

1. Керівні принципи сталого розвитку Європейського континенту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rm.coe.int/168070018e>. – Дата доступу: 06.02.2019.
2. Указ про прийняття Стратегії сталого розвитку «Україна – 2020» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5/2015>. – Дата доступу: 19.05.2017.
3. Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна», 2017. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.idss.org.ua/monografii/2017_SDGs_NationalReport.pdf. – Дата доступу: 23.07.2018.
4. Руденко Л. Г. Національна доповідь України про стан виконання положень «Порядку денного на XXI століття» за десятирічний період. Звіт з НДР № держреєстрації 0112U006426 / Л. Г. Руденко, Б. В. Буркинський, Г. П. Галушкіна, Г. В. Герасименко та ін. – Київ. – 2012. – 345 с.
5. Завдання географії у впровадженні в Україні парадигми сталого розвитку і цілей 2030. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://don.kyivcity.gov.ua/files/2018/3/30/1.pdf>. – Дата доступу: 06.02.2019.
6. Tkachenko T. Research of cooling effect of vegetation layer of green structures in construction / T. Tkachenko, V. Mileikovskiy // International Scientific and Practical conference “World science”. – 2017. – Vol. 1. – no 7 (23). – P. 22-24.
7. Tkachenko T. Energy Efficiency of “Green Structures” in Cooling Period / T. Tkachenko // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol 7. – No 3.2. – P. 453-457. <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14570>
8. Ткаченко Т. М. Натурні дослідження «охолоджувального ефекту» вертикального озеленення будівель / Т. М. Ткаченко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2018. – Вип. 25. – С. 44-49.
9. Белоусов В. Н. Энергосбережение и выбросы парниковых газов / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Ю. Лакомкин. – Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2014. – 52 с.
10. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – Чинні від 01.11.2011. – Київ: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с.
11. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. – Чинні від 01.05.2017. – Київ: Укрархбудінформ, 2017. – 33 с.
12. Rakotondramiarana H. T. Dynamic Simulation of the Green Roofs Impact on Building Energy Performance, Case Study of Antananarivo, Madagascar / H. T. Rakotondramiarana, T. F. Ranaivoarisoa, D. Morau // Buildings. – 2015. – №5. – P. 497-520. <http://doi.org/10.3390/buildings5020497>

References

1. *Kerivni pryntsyipy staloho rozvytku Yevropeiskoho kontyventu*. <https://rm.coe.int/168070018e>. Accessed 06 February 2019.
2. *Ukaz pro pryiniattia Stratehii staloho rozvytku «Ukraina – 2020»*. <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5/2015>. Accessed 19 May 2017.
3. *Natsionalna dopovid «Tsili Staloho Rozvytku: Ukraina», 2017*. http://www.idss.org.ua/monografii/2017_SDGs_NationalReport.pdf. Accessed 23 July 2018.
4. Rudenko L. H., Burkynskiy B. V., Halyshkina H. P., Herasymenko H. V. ta in. *Natsionalna dopovid Ukrainy pro stan vykonannia polozhen «Poriadku dennoho na XXI stolittia» za desiatyrichnyi period. Zvit z NDR № derzhreiestratsii 0112U006426*. 2012. 345 p.
5. *Zavdannia heohrafii u vprovadzheni v Ukraini paradyhmy staloho rozvytku i tsilei 2030*. <https://don.kyivcity.gov.ua/files/2018/3/30/1.pdf>. Accessed 06 February 2019.
6. T. Tkachenko, V. Mileikovskiy. Research of cooling effect of vegetation layer of green structures in construction. *International Scientific and Practical conference “World science”*. 2017. Vol. 1. no 7 (23). pp. 22-24.
7. Tkachenko T. Energy Efficiency of “Green Structures” in Cooling Period. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol 7, no 3.2. pp. 453-457. <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14570>
8. Tkachenko T. M. Naturni doslidzhennia «okholodzhuvalnoho efektu» vertykalnoho ozelenennia budivel. *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohapostachannia*. 2018. Vol. 25. pp. 44-49.
9. Belousov V. N., Smorodin S. N., Lakomkin V. Yu. *Energoberezhennia i vybrosy parnikovyykh gazov*, SPbGTURP, 2014
10. *Budivelnna klimatolohiia*. DSTU-N B V.1.1-27:2010, Ukrarkhbudinform, 2011.
11. *Teplova izoliatsiia budivel*. DBN V.2.6-31:2016, Ukrarkhbudinform, 2017.
12. Rakotondramiarana H. T., Ranaivoarisoa T. F., Morau D. Dynamic Simulation of the Green Roofs Impact on Building Energy Performance, Case Study of Antananarivo, Madagascar. *Buildings*. 2015. no 5. pp. 497-520. <http://doi.org/10.3390/buildings5020497>

УДК 536.2:620.9:502

Оценка экономии энергии и косвенного уменьшения выбросов CO₂ вертикальным озеленением

Т. Н. Ткаченко¹, В. А. Мілейковський², О. Н. Гунченко³

¹д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID:0000-0003-2105-5951

²к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, v_mil@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8543-1800

³к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, gunchenko.oksana@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5769-2496

Аннотация. В исследовании рассмотрено формирование предпосылок устойчивого развития с учётом фактора безопасности. Благодаря внедрению технологий «зелёного строительства» создаются предпосылки для повышения безопасности человека в условиях урбанизированной среды как на этапе производственного процесса (от изготовления строительных материалов и их утилизации и во время выполнения строительных работ), так и во время эксплуатации уже построенных объектов. Показано, что одним из действенных способов повышения комфорта и безопасности в строительной отрасли и в любой урбанизированной среде является вертикальное озеленение зданий. Проведённые в предыдущей работе натурные исследования «охлаждающего эффекта» вертикального озеленения зданий показали повышенный охлаждающий эффект по сравнению с горизонтальным озеленением. При шпилье для озеленения диким виноградом (Parthenocissus) значения «охлаждающего эффекта» составляет 1,23 К. С учётом этого значения внесены поправки в формулу для определения зависимости охлаждающего эффекта от скорости ветра. Рассчитаны экономия энергии и косвенное уменьшение выбросов CO₂ от охлаждающего эффекта вертикального озеленения для различных видов топлива в тёплый период года. Полученные результаты показывают целесообразность использования вертикального озеленения для повышения энергоэффективности зданий и уменьшение выброса парниковых газов на теплогенераторах.

Ключевые слова: устойчивое развитие, безопасность, зелёная конструкция, зелёное строительство, вертикальное озеленение, энергоэффективность, парниковые газы

УДК 536.2:620.9:502

Assessment of energy savings and indirect reduction of CO₂ emissions by vertical gardening

T. Tkachenko¹, V. Mileikovskiy², O. Hunchenko³

¹Dr.Hab., Prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID:0000-0003-2105-5951

²PhD., assoc. prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, v_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

³PhD., assoc. prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, gunchenko.oksana@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5769-2496

Abstract. In the study, the formation of the prerequisites for sustainable development is considered, taking into account the safety factor. Thanks to the introduction of green building technologies, preconditions are being created for improving human security in an urbanized environment both at the stage of the production process (from the manufacture of building materials and their disposal and during construction work), and during the operation of already constructed buildings. It is shown that one of the effective ways to increase comfort and safety in the construction industry and in any urban environment is the vertical gardening of buildings. The field studies of the "cooling effect" of the vertical gardening of buildings carried out in the previous work showed an increased cooling effect compared to horizontal gardening. When calmness for gardening with Virginia creeper (Parthenocissus), the value of the "cooling effect" is 1.23 K. Based on this value, amendments are made to the formula for determination of the dependence of the cooling effect on wind speed. The energy savings and indirect reduction of CO₂ emissions from the cooling effect of vertical gardening for various types of fuel in the warm season are calculated. Saving cold from the wall with a minimum (in Ukraine) heat transfer resistance of 3.3 m² K / W (overall heat transfer coefficient $U = 1 / 3.3 = 0.303 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) is 8083 J / m². The indirect (at the energy source) reduction in CO₂ emissions for coal combustion is 632 g / m², and for gas – 372 g / m². For comparison, at gardening with perennial ryegrass (Lolium perenne) of a roof with minimum (for Ukraine) heat transfer resistance 6 m² K / W (overall heat transfer coefficient $U = 1 / 6 = 0.167 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), we have the saving of cold 3620 J / m². The

indirect (at the energy source) reduction in CO₂ emissions for coal combustion is 283 g / m², and for gas – 167 g / m². The results show the feasibility of using vertical gardening to increase the energy efficiency of buildings and reduce greenhouse gas emissions from heat generators.

Keywords: sustainable development, safety, green construction, green structures, vertical gardening, energy efficiency, greenhouse gases

Надійшла до редакції / Received 30.09.2019.

УДК 697.94

Обґрунтування поглибленого ексергоекономічного аналізу систем кондиціонування повітря

О. В. Задоянний¹

¹к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, м.Київ, Україна, zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6781-9756

Анотація. Системи кондиціонування повітря (СКП) є найбільш енергосміними серед систем забезпечення мікроклімату приміщень. Вони споживають усі види енергії, що виробляють енергогенераційні компанії. На сьогодні не розроблено коректну гармонізовану методологію аналізу та оптимізації енергоспоживання систем кондиціонування повітря. Відносно невисокі значення термодинамічних потенціалів при перетворенні матеріальних та енергетичних потоків СКП спонукають до аналізу всіх складових ексергії вологого повітря систем. Цими складовими є термічна, механічна та хімічні концентраційні: вологісна й двоокису вуглецю. Аналіз зазначених складових показує їхню сумірність і потребує коректного врахування при проведенні ексергоекономічного аналізу. Результати поглибленого ексергоекономічного аналізу показують нові якості СКП та їхніх елементів у вигляді відносних та абсолютних характеристик енергоефективності. Ними варто користуватися при оптимізації систем за критеріями мінімізації енергоспоживання, при конструюванні енергоощадних схемних рішень СКП та для моніторингу при експлуатації.

Ключові слова: кондиціонування повітря, ексергетичний аналіз, вологе повітря, балансове ексергетичне рівняння, ексергетична ефективність, ексергетична потокова діаграма, ексергоекономічний аналіз, ексергетична вартість потоку

Постановка проблеми. Системи кондиціонування повітря (СКП) будівельних об'єктів споживають усі наявні види енергії, які генерують промислові й комунальні енергогенераційні підприємства. Енергоспоживання цими системами зазвичай не аналізують належним чином. У багатьох випадках упродовж життєвого циклу обладнання фіксують тільки загальні витрати на енергоносії та різні питомі показники енергоспоживання. У ринкових умовах зазначена ситуація не стимулює виконання аналізу енергоощадності СКП, який передувє відповідним заходам підвищення енергоефективності. Першочерговим кроком подолання енергетичної кризи в Україні в цілому та житлово-комунальному секторі зокрема є своєрідна "інвентаризація" енергоспоживання системами забезпечення мікроклімату будівельних об'єктів. Вона передбачає визначення рівня та відповідного класу енергоспоживання будівельними об'єктами із розробкою енергетичних сертифікатів [1]. Наступним кроком планується так звана енергомодернізація. Вона передбачає нескладні з інженерної точки зору рішення щодо теплоізоляції огорожень з метою зменшення тепловтрат. Крім того, передбачено модернізацію інженерних систем створення й підтримки мікроклімату будівель. Останні заходи потребують перш за все визначення показників ощадного енергоспоживання системами. Чинні національні нормативні документи України регламентують певні

конкретні вимоги до енергоефективності вказаних систем, але не дають коректних методологічних рекомендацій щодо оцінки показників енергоспоживання ними [2]. Норми регламентують, зокрема, оцінювати коефіцієнтом корисної дії прилади й системи для нагрівання, охолодження й зволоження повітря в будівлях. Окремі документи містять методичні рекомендації щодо оцінки енергетичної ефективності систем кондиціонування повітря, які на наш погляд не можуть забезпечити вимог вказаних будівельних норм [3]. Таким чином, виникає методологічна проблема коректної оцінки показників енергоощадності систем забезпечення мікроклімату. У даній роботі розроблено узагальнені науково-методологічні положення оцінки енергоефективності систем кондиціонування повітря будівельних об'єктів, яка базується на сучасній ексергоекономічній теорії [4].

Останні дослідження та публікації. Традиційний підхід при ексергетичному аналізі СКП оперує оцінкою ексергетичних потоків та значеннями повної деструкції ексергії повітря. Він не дозволяє коректно визначати ефективність більшості процесів при обробці повітря в СКП. Це пояснюється тим, що процеси тепловологісної обробки повітря в функціональних вузлах СКП не є кінцевими, тобто вихідні потоки ексергії не є "продуктом", як у класичному ексергетичному аналізі [4, 7]. Це положення було нами доведено в роботі [8] при

порівняльному аналізі СКП. Крім того, усталене тлумачення поняття “деструкція” відповідає знищенню ексергії потоку. Однак, у більшості випадків процесів у СКП це поняття характеризує “корисний” ефект термодинамічних перетворень [8]. Відповідно до цього положення витікають особливості складання ексергетичних балансових рівнянь та відносного показника – ексергетичної ефективності – функціональних елементів, вузлів та системи в цілому. Окремі автори оцінюють загальну ексергетичну ефективність процесів у СКП і не надають уваги елементарним процесам (зволоженню, нагріванню, охолодженню), які характеризуються відповідними складовими ексергії повітря [9]. Подібний підхід унеможливує розширення предметності аналізу, яка в багатьох випадках відіграє ключову роль у висновках. Це положення повною мірою поширюється й на оцінку ексергетичної вартості процесів, визначення якої є заключним результатом ексергоекономічного аналізу [4] і є відправним показником як для інвестиційного проекту, так і для оцінки експлуатаційних витрат. Вищенаведене свідчить про відсутність гармонізованої методології оцінки показників енергоощадності СКП, яка має ґрунтуватися на поглибленому ексергоекономічному аналізі з урахуванням складових ексергетичних потоків систем.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є обґрунтування сутності, можливостей і переваг поглибленого ексергоекономічного аналізу в дослідженні систем кондиціонування повітря на прикладі різних схемних рішень та вихідних кліматичних даних. Сутність поглибленого ексергетичного аналізу обґрунтовується через урахування всіх складових ексергії вологого повітря при дослідженні систем. Переваги перед відомими методами дослідження та класичним ексергетичним методом виявляються в отриманні нових якостей – критеріїв ексергетичної ефективності з урахуванням складових ексергії повітря в СКП. До вказаних нових якостей додається економічна оцінка ексергетичних перетворень в СКП, що підтверджує коректність та новизну науково-методологічних положень поглибленого ексергоекономічного аналізу.

Основна частина. Ексергетичний аналіз є універсальним методом з огляду, перш за все, можливості досліджень відмінних за характером процесів. У системах кондиціонування повітря особливість ексергетичних потоків полягає в їхній сумірності. Їхні дослідження потребують особливого підходу, а саме, ураху-

вання всіх складових ексергетичних потоків не тільки повітря, що обробляється, а й потоків, які присутні в кондиціонованому приміщенні. До останніх відносять:

- конвективні:
 - теплові;
 - вологісні;
- променеві:
 - від сонячної радіації (прямі й відбиті);
 - від нагрітих поверхонь;
 - від радіаційних охолоджувачів і нагрівачів.

Вони мають відмінну особливість – порівняно невеликі значення потенціалів. Особливість енергетичних потоків живлення кондиціонера, окрім електричних, полягає в різному агрегатному стані робочих тіл, від якого прямо залежать фізичні ефекти при обробці повітря. Це рідинні тепло- та холодоносії (холодоагенти). Вони можуть змінювати фізичний стан при обробці повітря та теплохолодоносія (холодоагенту) в тепломасообмінних апаратах і повітроводах. Ексергетичні потенціали вказаних потоків мають відносно невеликі значення [10] порівняно з потоками в енергетичних системах. Це потребує більш ретельного аналізу складових ексергетичних потоків.

Дослідження систем кондиціонування повітря проводять в основному із використанням ексергетичних функцій вологого повітря та потоку рідини як базових [7, 10]. Результати аналізу загалом дають коректні результати. Однак на наш погляд в окремих випадках їм бракує більш ретельної оцінки окремих вузлів та процесів. Наприклад, у роботі [11] за результатами аналізу СКП показано значення відносної ексергетичної ефективності для другого підігріву (Re-heating) менше нуля, що суперечить поняттю “коефіцієнт корисної дії” та унеможливує порівняння систем за показниками енергоощадності.

Аналіз результатів розрахунку складових ексергії вологого повітря, які мають місце в СКП, показує, що варто брати до уваги всі наявні складові: термічну, механічну та хімічну, яка представлена концентраційними вологісною та двоокису вуглецю [8]. Їхні значення показують достатню для урахування відмінність однієї від іншої.

Вказане вище говорить про необхідність перегляду підходу до складання балансових рівнянь з урахуванням знаку деструкції потоків складових. Відповідно до рівнянь ексергетичних балансів та функціонального призначення об’єкта дослідження визначають “корисні” й “витратні” складові. При цьому “корисні”

складові вибирають відповідно до нового завдання аналізу – нової якості відповідної складової, – наприклад, парціальної ексергетичної ефективності. На відміну від класичного визначення корисного ефекту при поглибленому аналізі його визначають через абсолютне значення деструкції потоків складових [8, 12].

Прикладом характерного об'єкта з отриманням нових результатів при поглибленому аналізі є поверхневий охолоджувач або камера зрошування, де мають місце ефекти охолодження й осушення повітря одночасно. Визначення їхньої ефективності було проведено за трьома корисними ефектами – охолодження, осушення та двох разом [12]. Це надає змогу більш детально аналізувати, порівнювати й оцінювати кожен з ефектів.

Корисним інструментом поглибленого ексергетичного аналізу є діаграма ексергетичних потоків (рис. 1). З неї видно як змінюються потенціали складових ексергії вологого повітря в СКП при послідовній його обробці. Характерною є ділянка 3-6, де в поверхневому повітроохолоджувачі здійснюється конденсаційне осушення повітря і спостерігається деструкція вологісної, термічної, механічної та повної ексергії повітря. Аналіз деструкцій ексергії вказаного вузла наведений в роботі [12] аргументовано доводить нераціональність процесів обробки – криві ексергетичних потоків повітря характеризуються “піками” й “провалами” в процесах обробки, що підтверджує їхню високу енергомісткість.

З діаграми видно, що некоректно брати до

оцінки ексергетичної ефективності значення деструкції повної ексергії. Наприклад, при порівнянні деструкції складових ексергії з повною ексергією видно, що значення останньої не варто використовувати для аналізу. Вони не показують функціональних деструкцій складових. Наприклад, на ділянці 3-4, де здійснюється сухе охолодження повітря, деструкція “корисної” термічної складової становить 0,5 кДж/кг, а повної – “витратної” – за абсолютним значенням 0,12 кДж/кг, що в понад чотири рази менше.

Відповідне відношення (ексергетична ефективність) “корисної” до “витратної” складових буде набагато більше одиниці, що є нонсенсом.

Як видно з діаграми, величини деструкцій складових ексергії повітря мають різні знаки, що говорить про її векторний характер і підтверджує аналогічне положення з аналізу хімічних процесів [13]. Корисність цієї особливості при поглибленому ексергетичному аналізі СКП стосовно термічної складової нами була доведена в роботі [15]. Це дозволяє визначити вид повітрообміну за знаком деструкції та степінь енергоефективності – за величиною деструкції.

Відносне зіставлення “корисної” ексергії повітря до “витратної” варто характеризувати як ефективність “нетто”. Її доцільно використовувати в СКП при попередньому аналізі енергоефективності процесів обробки повітря, наприклад, на стадії проектування.

У загальному вигляді ексергетична ефективність “нетто” буде мати вигляд

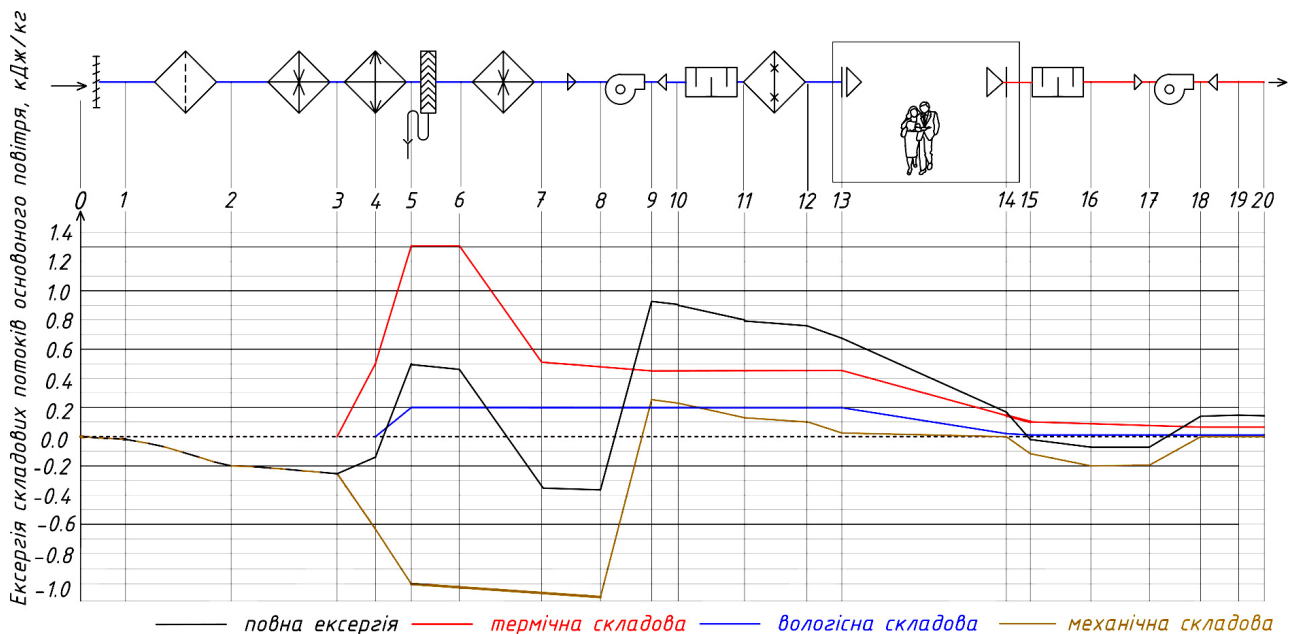


Рис. 1. Діаграма ексергетичних потоків основного повітря в центральній СКП для теплового розрахункового періоду 0 ... 20 – ділянки системи

$$\eta_{ex}^{net} = \frac{\sum_i |\Delta Ex_i|}{\sum_j |\Delta Ex_j|}, \quad (1)$$

де ΔEx_i – “корисні” та ΔEx_j – “витратні” складові ексергетичного потоку, кДж/кг, основного повітря, що обробляється в елементах СКП.

У формулі (1) беруть до уваги ексергію основного потоку повітря і не враховують ексергію від підведених потоків (рециркуляційне повітря, теплоносій, холодоносій, електроенергія тощо) [14].

З діаграми (рис. 1) видно, як розподіляються складові ексергетичних потоків повітря в приміщенні (ділянка 13-14). Характерним для цієї ділянки є те, що всі ексергетичні потенціали мають позитивний знак як на початку, так і в кінці процесу повітрообміну.

Найбільший потенціал як на вході “in” (т. 13) так і на виході “l” (т. 14) має повна ексергія повітря, найменший – механічна, оскільки всі складові мають позитивний знак, а повна ексергія є сумою всіх складових. Для цього випадку при підрахунку ефективності “нетто” за “витратну” можна брати деструкцію повної ексергії $\Delta Ex_{повн}$, а за “корисну” – обрану складову. Тоді формула (1) набуде вигляду:

$$\eta_{ex}^{net} = \frac{\Delta Ex_i^{in-l}}{\Delta Ex_{повн}}. \quad (2)$$

Цим рівнянням варто користуватися при визначенні парціальної ексергетичної ефективності “нетто” стосовно обраної складової i .

Величина в чисельнику рівняння (2) фактично є енергетичним показником асиміляційної здатності вентиляційного повітря. Вона показує скільки витрачено ексергії повітрям на здійснення процесу повітрообміну – асиміляцію надлишків шкідливих потоків. Результати дослідження термічної складової ексергетичної функції повітря при асиміляції надлишків теплоти в приміщенні наведено в роботі [15], де аргументовано доведено вищенаведене положення.

Для кондиціонування повітря громадських та адміністративних будівель як “корисні” може бути прийнято термічну, вологісну складові та двоокису вуглецю.

Як видно з діаграми та відповідно до попередніх міркувань, характерною особливістю підрахунку ексергетичної ефективності є те, що значення деструкції як “корисних” ΔEx_i , так і “витратних” ΔEx_j потоків основного

повітря підсумовують за абсолютними величинами. Ця особливість характерна, наприклад, для поверхневого охолоджувача, де здійснюється одночасно охолодження й осушення повітря. Ексергія потоку основного повітря в цьому вузлі набуває від’ємного значення, а деструкція збільшує її [12]. Таке само спостерігається, наприклад, на ділянці 6-7 (другий підігрів).

Деструкція ексергетичного потоку холодоносія, що підводиться до поверхневого охолоджувача, також може бути від’ємною завдяки збільшенню температури та зменшенню тиску після охолоджувача [8].

Характерним випадком наявності ексергетичних потенціалів повітря різних знаків у одному функціональному вузлі є вентилятор СКП. На ділянках 8-9 та 17-18 спостерігається перехід кривої механічної складової ексергії з від’ємного потенціалу на додатний.

Крива механічної складової ексергії повітря на діаграмі за характером зміни ідентична епюрі повного тиску нагнітача в мережі. Спостерігається деструкція тільки механічної складової, якщо нехтувати незначною деструкцією термічної за рахунок збільшення температури повітря, якщо це має місце.

За “корисну” беруть різницю ексергетичних потенціалів на вході й на виході повітря вентилятора, а за “витратну” – енергію на валу привода Ex_{dr} , кДж/кг, яка відповідно до властивості електричної енергії дорівнює ексергії [7]. Для визначення ексергетичної ефективності вентилятора варто використовувати залежність

$$\eta_{ex}^{fan} = \frac{\Delta Ex^{out-in}}{Ex_{dr}}. \quad (3)$$

Однією з переважних властивостей ексергетичного методу є адитивність фізичних величин, якими характеризується об’єкт досліджень, що при поглибленому аналізі дало можливість отримати й оцінити нові якості. При повітрообміні відбувається процес турбулентного переносу різних за природою, фізичним станом та параметрами потоків теплоти, вологого повітря та домішок хімічних речовин. Ці потоки в інженерній практиці усталено визначають через різні розмірності, зручні для інженерних розрахунків – концентрацію (масову та об’ємну), тепловий потік, температурний напір, потужність тощо.

Визначення вказаних потоків через одиниці ексергії відкрило нові можливості дослідже-

ння енергоощадності схемних рішень розподілу повітря, які представлено новими якісними характеристиками повітрообміну. Так, наприклад, за результатами досліджень поведінки функції термічної складової ексергетичного потоку вологого повітря в межах кондиціонованого приміщення отримано коректні чисельні результати з оцінкою деструкції в процесі повітрообміну. Це дало можливість аналітично визначати за значенням та знаком деструкції види повітрообміну та ступінь енергоефективності [15].

Те саме стосується хімічних складових – вологісної концентраційної та двоокису вуглецю. Ці нові якості – величина та знак деструкції ексергії – надають можливість коректно розраховувати й визначати енергоощадні схеми організації повітрообміну.

Ексергетичний аналіз СКП передбачає припущення, що деструкція основного потоку повітря в СКП можлива тільки за рахунок незворотності. Це означає, що ентропія в її класичному розумінні як розсіювання теплоти в навколишнє середовище відсутня [7]. Такий висновок витікає з того, що обладнання СКП зазвичай добре теплоізольоване, а перепад температури є незначним. Тоді теплообміном між повітрям всередині обладнання та навколишнім середовищем можна нехтувати.

За відносним показником ексергетичної ефективності “брутто” варто оцінювати показники енергоощадності СКП при виборі варіантів енергопостачання. Оцінюють деструкцію всіх “вторинних” (витратних) потоків та їхніх складових, які впливають на основний – повітря, що обробляється в СКП. Інженерні залежності, зручні для визначення цих потоків, наведено в роботі [10].

У роботі [8] наведено результати поглибленого ексергетичного аналізу з оцінкою деструкції потоків рециркуляційного повітря, холодоносія, теплоносія, променевих потоків та електричної енергії при порівнянні двох варіантів місцевих пристроїв СКП. Характерним прикладом у вказаних результатах аналізу є обґрунтування вибору “корисного” ефекту, як складеного з величин деструкції ексергії вентиляційного повітря та променевого потоку радіаційної панелі, оскільки ці потоки формують комфортні умови в приміщенні. За результатами аналізу радіаційну панель визначено більш ефективною за фанкойл у теплий період та приблизно однакової ефективності – у холодний. Загальний вид формули для ексергетичної ефективності “брутто”

$$\eta_{ex}^{brt} = \frac{\sum_i |\Delta Ex_i|}{\sum_k |\Delta Ex_k|}, \quad (4)$$

де ΔEx_k – “витратні” деструкції потоків енергоносіїв, кДж/с.

За результатами оцінки значень деструкції всіх видів ексергії при поглибленому аналізі СКП оцінюють найбільш економічно вигідні рішення з урахуванням ціни ексергії кожної складової. Поєднання термодинамічного аналізу з економічним дає можливість не тільки оптимального проектування СКП, а й коригування її роботи при моніторингу.

Сучасна теорія *термоекономіки* базується на методі *SPECO* (*SP*ecific *Ex*ergy *CO*sting), що “об’єднує” ексергію з економікою показником ексергетичної вартості для потоку [4]

$$C_i = c_i E_i = c_i (g_i e_i), \text{ грн/с}, \quad (5)$$

де c_i – вартість ексергії, грн/кДж; g_i – масовий потік речовини, кг/с; e_i – питома ексергія потоку, кДж/кг.

У запропонованому нами варіанті поглибленого ексергоекономічного аналізу для СКП показником ексергетичної вартості потоку C_i , грн/с, доцільно користуватися як накопичувальним суми вартості деструкцій в усіх функціональних елементах системи. Такий метод дає можливість послідовно (за ходом потоку повітря) аналізувати накопичені значення ексергетичної вартості повітряного потоку в СКП. Результатом такого аналізу є накопичена ексергетична вартість відповідного схемного рішення, яка показує ексергетичні й економічні показники.

Для СКП з традиційним конденсаційним методом осушення повітря (рис. 2) подано графічне зображення інтегральної потокової діаграми ексергетичної вартості, яка демонструє вказаний метод (рис. 3). Подібна оцінка доцільна для порівняння проектних рішень за певної можливої невизначеності результатів ексергетичного аналізу та при підготовці інвестиційних пропозицій. Так, наприклад, у роботі [16] подано результати ексергоекономічних розрахунків при виборі схемного рішення обробки повітря в СКП для приміщення фармацевтичної промисловості. Було проаналізовано три схемні рішення СКП з різними варіантами осушення повітря: адсорбційним, конденсаційним та комбінованим – адсорбційним з конденсацією.

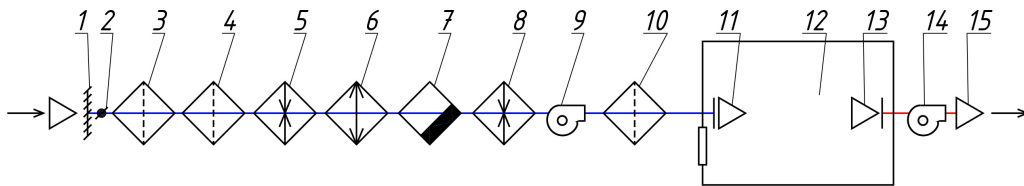


Рис.2. Схема СКП з конденсаційним методом осушення повітря
 1 – повітрязабірна решітка; 2 – заслінка; 3,4,10 – фільтри; 5,8 – поверхневі нагрівачі повітря;
 6 – поверхневий охолоджувач повітря; 7 – каплевловлювач; 9,14 – вентилятор; 12 – приміщення
 11,13 – припливна та витяжна решітки в приміщенні; 15 – викид назовні

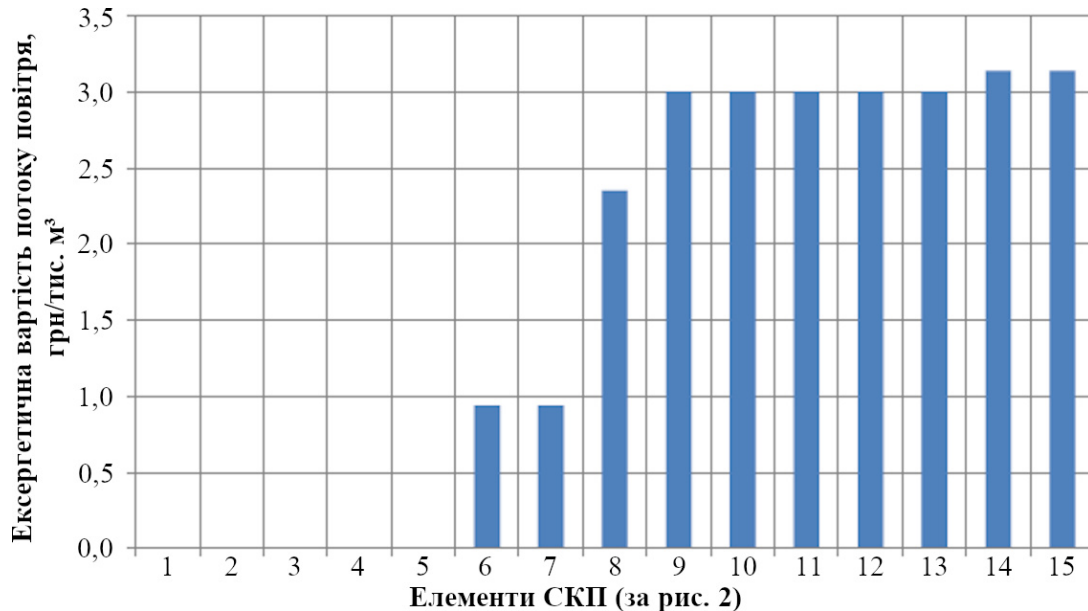


Рис. 3. Інтегральна потокова діаграма ексергетичної вартості повітря в СКП з конденсаційним методом осушення

Найбільш характерним прикладом вказаного методу аналізу є інтегральна потокова діаграма ексергетичної вартості для традиційного конденсаційного методу осушення повітря (рис. 3). Вона побудована для теплого періоду року. З діаграми видно поелементне накопичення ексергетичної вартості потоку основного повітря при послідовній його обробці в системі.

Розрахунки ексергетичної вартості потоку обробленого в СКП повітря в грн/1000 м³ проведено за формулою

$$C_{ex} = 1000 \sum E_{en}^{Tot} \rho_a C_{en}, \text{ грн/тис. м}^3, \quad (6)$$

де E_{en}^{Tot} – сумарне питоме значення підведеної до повітря ексергії, кДж/кг повітря; ρ_a – густина повітря, кг/м³; C_{en} – вартість ексергії електричної енергії, грн/кДж [17].

Спостерігається характерне збільшення вартості з шостого елемента – охолодження з конденсацією – та з восьмого – другий підігрів. Кінцева вартість для даної схеми склала 3,25 гривні на 1000 м³ повітря. За значенням кі-

нцевої накопиченої (повної) ексергетичної вартості повітря (15 елемент системи) вибирають відповідне схемне рішення для подальшої розробки.

Висновки. Подані в статті узагальнені положення щодо методології оцінки енергоощадних показників СКП на основі поглибленого ексергоекономічного аналізу є корисним інструментом для оцінки ступеню енергоощадності функціональних вузлів, елементів та СКП в цілому, включаючи приміщення, що ними обслуговуються та претендують на узагальнення й застосування в науковій та інженерній практиці. Наведені основні положення методології разом із посиланнями на джерела є достатніми для залучення фахівців для участі в оцінці й оптимізації роботи СКП щодо енергоефективності.

Перспективи подальших досліджень. У подальших роботах з цієї тематики планується оцінка сезонних показників енергоощадності СКП із застосуванням методів поглибленого ексергоекономічного аналізу. Крім того, плануються дослідження поведінки ексергетичних функцій в елементах СКП.

Література

1. Закон України "Про енергетичну ефективність будівель" від 22.06.2017 №2118-VIII [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>.
2. ДБН В.1.2-11-2008. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд економія енергії». – Чинні від 01 10 2008. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – V, 14 с.
3. Методика обстеження інженерних систем будівлі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0826-18/page2/print>.
4. Тсатсароннс Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Тсатсароннс Д. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.
5. Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Annex 49 Final Report [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.annex49.info/download/Annex49guidebook.pdf>.
6. Морозюк Т. В. Углубленный эксергетический анализ – современная потребность оптимизации энергопреобразующих систем / Т. В. Морозюк, Д. Тсатсаронис // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27. – №2. – С.88-92.
7. Бродянский В. М. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие / В. М. Бродянский, Г. П. Верховикер, Я. Я. Карчев и др. – Киев: Наукова Думка, 1991. – 360 с. – ISBN 5-12-0011397-X.
8. Задоянний О. В. Порівняльний эксергетичний аналіз пристроїв із створення мікроклімату офісних приміщень / О. В. Задоянний, О. О. Товстограй // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2019. – Вип. 28. – с. 17-27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.28.17-27>
9. Лабай В. Й., Гарасим Д. І. Дослідження эксергоефективності та шляхів енергозбереження системи кондиціонування повітря операційних чистих кімнат // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – Т. 51, вип. 4. – С. 53-59. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2015.48627>
10. Задоянний О. В. Види эксергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – Вип. 19. – с. 3-15.
11. Marletta L. Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective / L. Marletta // Entropy. – 2010. – no 12. – P. 859-877. <https://doi.org/10.3390/e12040859>
12. Задоянний, О. В. Особливості визначення эксергетичної ефективності вузла «повітроохолоджувач-каплевловлювач-повітронагрівач» прямої токової СКП з використанням діаграми потоків эксергії вологого повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 7. – с. 95-103.
13. Sato N. Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers. / N. Sato. – Elsevier Science & Technology Books, 2004. – 149 p.
14. Задоянний О. В. Эксергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд / О.В.Задоянний // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:- наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 17. – с. 3-9.
15. Задоянний, О. В. Дослідження функції термічної складової эксергетичного потоку вологого повітря в кон-диціонованому приміщенні / О. В. Задоянний // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2018. – Вип. 19. – с. 19-24.
16. Zadoyanny O. V. Exergoeconomic Analysis of Air Cooling Systems / O. V. Zadoyanny, Y. M. Yevdokymenko // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2016. – Вип. 20. – С. 14-23.
17. Роздрібні тарифи для споживачів електричної енергії у місті Києві. – [Електронний ресурс]. – URL: <http://kyivenergo.ua/ee-company/>

References

1. Zakon Ukrainy "Pro enerhetychnu efektyvnist budivel" vid 22.06.2017 №2118- VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>
2. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel i sporud ekonomiiia enerhii.* DBN V.1.2-11-2008. Minrehionbud Ukrainy, 2008.
3. *Metodyka obstezhennia inzhenernykh system budivli.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0826-18/page2/print>
4. Tsatsaronys D. *Vzaimodeistvie termodinamiki i ekonomiki dlia minimizatsii stoimosti energopreobrazuiushchei sistemy.* Studia «Negotsiant», 2002.
5. *Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Annex 49 Final Report.* <https://www.annex49.info/download/Annex49guidebook.pdf>
6. Moroziuk T.V., Tsatsaronys D. "Uglublennyi eksерgetycheskii analiz – sovremennaia potrebnost optimizatsii energopreobrazuiushchikh sistem." *Promyshlennaia teplotekhnika.* 2005. T.27. №2. P. 88-92.
7. Brodianskyi V. M., Verkhyker H. P., Karchev Ya. Ia. i dr. *Eksergetycheskie raschety tekhnicheskikh sistem.* Naukova Dumka, 1991. ISBN 5-12-0011397-X.

8. Zadoiannyi O. V., Tovstohrai O. O. "Porivnialnyi ekserhetychnyi analiz prystroiv iz stvorennia mikroklimatu ofisnykh prymishchen." *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2019. Vyp. 28. P. 17-27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.28.17-27>
9. Labai V. Y., Harasym D. I. "Doslidzhennia ekserhoefektyvnosti ta shliakhiv enerhozberezhennia systemy kondytsionuvannia povitria operatsiinykh chystykh kimnat." *Kholodyna tekhnika ta tekhnolohiia.* 2015. T. 51, vyp. 4. P. 53-59. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2015.48627>
10. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Vydy ekserhii v systemakh kondytsionuvannia povitria ta yikh vyznachennia." *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2016. Vyp. 19. P. 3-15.
11. Marletta L. "Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective." *Entropy.* 2010. no 12. P. 859-877. <https://doi.org/10.3390/e12040859>
12. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Osoblyvosti vyznachennia ekserhetychnoi efektyvnosti vuzla «povitrookholodzhuvach-kaplevlovliuvach-povitronahrivach» priamotokovoi SKP z vykorystanniam diahramy potokiv ekserhii volohoho povitria." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: nauk.-tekhn. zb.* 2015. Vyp.7. s. 95-103.
13. Sato N. *Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers.* Elsevier Science & Technology Books, 2004.
14. Zadoiannyi O. V. "Ekserhetychni kryterii pry otsyntsi enerhooshchadnosti system kondytsionuvannia povitria budivel i sporud." *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2014. Vyp. 17. P. 3-9.
15. Zadoiannyi, O. V. "Doslidzhennia funktsii termichnoi skladovoi ekserhetychnoho potoku volohoho povitria v kon-dytsionovanomu prymishchenni." *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2018. Vyp. 19. P. 19-24.
16. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Exergoeconomic Analysis of Air Cooling Systems." *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2016. Vyp. 20. P. 14-23.
17. Rozdribni taryfy dlia spozhyvachiv elektrychnoi enerhii u misti Kyevi. <http://kyivenergo.ua/ee-company/>

УДК 697.94

Обоснование углублённого эксергоэкономического анализа систем кондиционирования воздуха

А. В. Задоянный¹

¹к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua, ORCID:0000-0001-6781-9756

Аннотация. Системы кондиционирования воздуха (СКВ) является наиболее энергоёмкими среди систем обеспечения микроклимата помещений. Они потребляют все виды энергии, которые производят энергогенерирующие компании. На сегодняшний день не разработана корректная гармонизированная методология анализа и оптимизации энергопотребления систем кондиционирования воздуха. Относительно невысокие значения термодинамических потенциалов при преобразовании материальных и энергетических потоков СКП требуют анализа всех составляющих эксергии влажного воздуха систем. Этими составляющими являются термическая, механическая и химические концентрационные: влажностная и двуокиси углерода. Анализ указанных составляющих показывает их соизмеримость и требует корректного учёта при проведении эксергоэкономического анализа. Результаты углублённого эксергоэкономического анализа показывают новые качества СКП и их элементов в виде относительных и абсолютных характеристик энергоэффективности. Им стоит пользоваться при оптимизации систем по критериям минимизации энергопотребления, при конструировании энергоэффективных схемных решений СКП и для мониторинга при эксплуатации.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха, эксергетический анализ, влажный воздух, балансовое эксергетическое уравнение; эксергетическая эффективность, эксергетическая потоковая диаграмма; эксергоэкономический анализ; эксергетическая стоимость потока.

UDC 697.94

Grounding of in-depth exergoeconomic analysis of air conditioning systems

O. Zadoiannyi¹

¹PhD, associate professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua,
ORCID:0000-0001-6781-9756

Abstract. Air-conditioning systems are the most energy-intensive of the indoor climate systems. They consume all types of energy produced by energy generating companies. Traditional methodological approaches to the estimation of exergy efficiency do not produce correct results. Ukrainian national standards do not sufficiently provide methodologies for assessing the energy efficiency of air conditioning systems for buildings. A harmonized methodology is required to properly assess the energy consumption of these systems. The relatively low values of the thermodynamic potentials in these systems require the analysis of all components of the wet air exergy, which are thermal, mechanical and chemical: humidity and carbon dioxide. An in-depth exergy analysis, taking into account all the components of moist air exergy, reveals new qualities and determines the partial characteristics in the performance indicators of systems and elements. The analysis of the behavior of the thermal exergy component during the air exchange in the room determines the type of air exchange and energy costs. The analysis of all components shows their commensurability and needs to be properly taken into account in the exergo-economic analysis. The results of in-depth exergo-economic analysis show the new qualities of HVAC systems and their elements in the form of relative and absolute energy-efficiency characteristics. They should be used for optimization of the systems (according to the criteria of minimizing energy consumption), design of the energy-efficient solutions and monitoring the energy consumption during operation of the systems. The research results presented in this article are based on real systems data. Methods for determining the performance of systems have been tested when designing and creating new solutions for the systems

Keywords: Air conditioning, exergy analysis, wet air, balance exergy equation; exergy efficiency; exergy flowcharts; exergoeconomic analysis; exergy flow cost.

Надійшла до редакції / Received 02.10.2019.

УДК 533.1:620.93:658.56

Створення експертно-моделювальної системи для аналізу факторів, які впливають на якість природного газу

Ю. Й. Франчук¹

асистент, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, franchuk196405@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7910-8705

Анотація. Проаналізовані вимоги чинних в Україні нормативно-технічних документів щодо визначення показників якості природних газів. Виконано порівняння з аналогічними європейськими та російськими стандартами. Для комплексного оцінювання якості природного газу запропоновано методу, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної. Встановлено чинники, що характеризують кількісні та якісні параметри фізико-хімічних властивостей видобутого з родовища природного газу, якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування та технічні умови експлуатації газорозподільних мереж населеного пункту. Виконано їхню формалізацію та ієрархічну класифікацію. Для факторів впливу на якість природного газу універсальні множини вибрано відповідно до вимог чинних нормативно-технічних документів, гармонізованих з європейським законодавством. Обґрунтовано вибір найбільш важливих фізико-хімічних властивостей природного газу для його енергетичної оцінки.

Ключові слова: природний газ, компонентний склад, якість газу, фізико-хімічні властивості, теплота згоряння, умови вимірювання, лінгвістична змінна, універсальна множина

Вступ. Природний газ є основним енергетичним ресурсом у нашій державі. Його частка в загальному первинному постачанні енергії сьогодні становить близько 30 %. Згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. її планується залишити на цьому ж рівні [1]. Близько 50 % природного газу використовується в житлово-комунальному господарстві для задоволення господарсько-побутових потреб мешканців житлових будинків та потреб у теплопостачанні, як централізованому, так і місцевому [2]. Водночас, у даній галузі домінують морально застарілі технології, технічно зношене обладнання та устаткування. Вона залишається найменш реформованою серед інших. Одними із ключових проблем є вимоги до якості палива та потреба встановлення ціни залежно від його енергетичної цінності та обсягів використання кінцевим споживачем.

Актуальність дослідження. Природний газ має високу цінність для економіки держави. Він є екологічно безпечним порівняно з іншими видами палива, серед яких і альтернативні. Однак, в Україні практично відсутній системний підхід до оцінювання його якості. Якість газу – це ступінь відповідності його показників встановленим вимогам, яка визначається його складом і фізичними властивостями.

Вимоги щодо фізико-хімічних властивостей природного газу регламентовані низкою нормативно-технічних документів [3...5]. При цьому вказані в них деякі характеристики (наприклад, вміст вуглекислого газу, умови вимірювання показників, значення теплоти згорян-

ня тощо) суперечать одна одній.

Критерієм оцінки якості газу, зазвичай, раніше було прийнято використовувати нижчу теплоту згоряння, визначену при так званих стандартних умовах [6]: температурі 20 °С і тиску 101,325 кПа. Як правило, в Україні [7] її величина перевищує мінімальне значення 32,66 МДж/м³ [3]. Лише на підставі цього робиться висновок про відповідність фізико-хімічних властивостей природного газу вимогам нормативних документів.

У нормативних документах, наприклад, у Кодексі [3], надано перелік різноманітних характеристик газу (вміст інгредієнтів, точка роси тощо) з граничними значеннями. Порівняно з аналогічними показниками використаного газу вони не дають кінцевому споживачеві повної інформації про його якість, зокрема, про енергетичну цінність. Проблема поглиблюється

- відсутністю достовірних приладів обліку з приведенням кількості спожитого газу до стандартних умов у переважній більшості (біля 8 млн.) мешканців житлових будинків;
- нарахуванням плати за укрупненими показниками для майже 3 млн. абонентів.

Окрім того, сьогодні мало чи не кожна газорозподільча організація в Україні не може перевірити фізико-хімічні властивості природного газу в кінцевого споживача [7].

Важливість вирішення зазначених проблем для забезпечення надійного, безперебійного та безаварійного газопостачання різноманітних об'єктів населених пунктів, а також впровадження інтелектуальних систем обліку природного

газу підкреслювалися на засіданні Громадської ради при Міністерстві енергетики та вугільної промисловості України [8].

Останні дослідження та публікації. За Законом України «Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до договору про заснування Енергетичного Співтовариства» [9] наша держава приєдналася до єдиного простору регулювання торгівлі газом. Вона взяла на себе зобов'язання виконувати всі рішення та процедурні акти, прийняті під час застосування Договору. Відповідно, кількість спожитого природного газу, що приймається-передається, повинна виражатися в одиницях енергії.

Інформація щодо фізико-хімічних властивостей газу, зокрема, теплоти згоряння, в Україні вже доступна кінцевому споживачеві – як власнику вузла комерційного обліку, так і абоненту житлового будинку. Наприклад, щомісяця за регіонами України публікується карта [7] із середньозваженими значеннями теплоти згоряння, що має різні значення залежно від:

- магістрального газопроводу;
- родовища газу;
- технологічного режиму його підготовки до транспортування;
- конкретної країни-експортера газу.

Складено маршрутні карти транспортування природного газу від газорозподільної станції чи іншого об'єкту газотранспортної системи (де визначають фізико-хімічні властивості природного газу) до будь-якого споживача в населеному пункті.

На сьогодні природний газ, попри розповсюджену інформацію щодо його високої вартості, залишається найдешевшим паливом на одиницю енергії. Чинна з 1 липня 2019 року ціна природного газу для побутових споживачів у Києві становить $C_1 = 6,48$ грн./м³ [10]. При нижчій теплоті згоряння за стандартних умов $H_f^\circ(25/20\text{ }^\circ\text{C}) = 33,08$ МДж/м³ [3] вартість на одиницю енергії становить лише $C_2 = 0,71$ грн/(кВт·год). Водночас, роздрібна ціна електричної енергії для побутових споживачів при обсязі споживання до 100 кВт·год на місяць є сталою на всій території України: $C_3 = 0,90$ грн/(кВт·год) [11].

Із виконаного аналізу наукових досліджень [12...15] та вимог чинних нормативно-технічних документів [3, 4, 16] впливає висновок, що визначенню якості природного газу приділяється значна увага. Однак, здебільшого йдеться про вдосконалення вимірювання окремих його параметрів без комплексного аналізу функціональних або кореляційних зв'язків між ними. Водночас, фізико-хімічні

властивості газу визначаються в точках прийому-передачі, наприклад, на газорозподільних станціях (ГРС). Ці властивості можуть зазнавати змін при транспортуванні газу газорозподільними мережами населеного пункту [13].

Формулювання цілей статті. Метою статті є вибір концепції оцінювання та показників для визначення якості природного газу як енергоносія.

Основна частина. З набуттям чинності Кодексу газотранспортної системи [3] розпочалося широке впровадження і використання термінології, запровадженої Державними стандартами України [16, 17] на підставі відповідного європейського законодавства [18] щодо проектування та експлуатації газопроводів і споруд на них. При цьому за ISO 6976:1995 [18] національне законодавство може містити певні відхилення від європейських норм, наприклад, щодо значень температури (табл. 1).

За 2018 р. економікою України спожито 32,3 млрд. м³ [2] природного газу, серед яких 21,0 млрд. м³ [21] – це газ власного видобутку. З урахуванням географічного положення України та організації газотранспортної системи колишнього СРСР з достатньою точністю можна припустити, що практично весь імпортований газ – 11,2 млрд. м³ – це частина газу російського походження, що проходить транзитом через Україну до Європейського Союзу.

Як приклад, проаналізуємо енергетичні властивості природного газу з Южно-Руського нафтогазового родовища ВАТ «Севернефтегазпром» Російської Федерації [22]. При цьому скористаємося вітчизняною методикою розрахунку його теплоти згоряння [17] (табл. 2, 3).

Відмінності умов вимірювання параметрів природного газу згідно з національними стандартами [17, 20] призводять до розбіжності визначеної теплоти згоряння не більше ніж 0,2 %. Для задач, які розглядаються, ця розбіжність несуттєва. Значно більшими (за абсолютною величиною) є похибки вимірювання кількості спожитого газу [23]. Отже, природний газ, імпортований з Російської Федерації, цілком відповідає вимогам нормативних документів нашої держави щодо енергетичних показників [3, 4].

Водночас, більш суттєвим є дуалізм власних вимог щодо фізико-хімічних властивостей газу, наведених у Кодексі газотранспортної системи [3] і Проекті технічного регламенту природного газу [4] (при цьому значення деяких параметрів останнього документу виходять за межі чинного), а саме:

Таблиця 1

Порівняльний аналіз термінів і визначень

Найменування	Нормативний документ	
	колишнього СРСР [6, 19], Російської Федерації [20]	Європейського Союзу [18], України [3, 16, 17]
1. Умови вимірювання параметрів природного газу:		
- стандартні	Температура згоряння і продуктів спалювання $T_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (293 К), тиск $p_1 = 760\text{ мм рт. ст.}$ (101,325 кПа)	Температура згоряння $T_1 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (298 К), теж, вимірювання $T_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (293 К), тиск $p_1 = 760\text{ мм рт. ст.}$ (101,325 кПа)
- нормальні	Температури згоряння і продуктів спалювання $T_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ (273 К), тиск $p_1 = 760\text{ мм рт. ст.}$ (101,325 кПа)	Температура згоряння $T_1 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (298 К), теж, вимірювання $T_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ (273 К), тиск $p_1 = 760\text{ мм рт. ст.}$ (101,325 кПа)
2. Теплота згоряння:		
- вища	Кількість теплоти, яка може виділитися при повному згорянні в повітрі певної кількості газу таким чином, що тиск p_1 , при якому відбувається реакція, залишається сталим, а усі продукти спалювання набувають того ж значення температури T_1 , що і температура реагентів. При цьому всі продукти знаходяться у газоподібному стані, за винятком води, яка конденсується в рідину при цій же температурі T_1^*	Енергія, яка може виділитися під час повного згоряння в повітрі певної кількості газу так, що тиск p_1 , за якого відбувається реакція, залишається сталим, а всі продукти згоряння повертаються до тієї самої певної температури T_1 , що і температура реагентів, всі ці продукти перебувають у газоподібному стані, за винятком води, що утворилася під час згоряння і конденсується в рідину за T_1
- нижча	Кількість теплоти, яка може виділитися при повному згорянні у повітрі певної кількості газу таким чином, що тиск p_1 , при якому відбувається реакція, залишається сталим, а усі продукти спалювання приймають те ж значення температури T_1 , що і температура реагентів. При цьому всі продукти знаходяться у газоподібному стані*	Енергія, що вивільнюється у вигляді теплоти під час повного згоряння на повітрі певної кількості газу, при цьому тиск p_1 , за якого відбувається реакція, залишається сталим, і всі продукти згоряння приводяться до однієї певної температури T_1 , і в газоподібному стані

Примітка. Визначення теплоти згоряння: вищої та нижчої, наведені у графі 2, стосуються термінології чинного стандарту Російської Федерації [20]. У стандартах колишнього СРСР [6, 19] термінологія щодо даного питання визначалася винятково умовами вимірювання (див. поз. 1 графі 2).

Таблиця 2

Фізико-хімічні властивості природного газу Южно-Руського нафтогазового родовища [22]

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	Норма	Фактичне значення
1	Компонентний склад:			
	- молярна частка метану	%	-	98,89
	- молярна частка етану	%	-	0,0400
	- молярна частка пропану	%	-	0,0019
	- молярна частка н-бутану	%	-	<0,001
	- молярна частка н-пентану	%	-	<0,001
	- молярна частка азоту	%	-	1,03
	- молярна частка діоксиду вуглецю	%	$\leq 2,5$	0,0080
	- молярна частка кисню	%	$\leq 0,020$	0,0123
2	Масова концентрація:			
	- сірководню:	г/м ³	$\leq 0,007$	<0,001
	- загальної сірки	г/м ³	$\leq 0,030$	<0,001
	- механічних домішок (смоли та пилу)	г/м ³	$\leq 0,001$	<0,001
3.	Теплота згоряння при 20 °С і 101235 Па			
	- вища	МДж/м ³	-	36,71
	- нижча	МДж/м ³	$\geq 31,8$	33,08
4.	Густина при 20 °С і 101235 Па	кг/м ³	-	0,6737

**Порівняльний аналіз енергетичних показників природного газу,
отриманих розрахунковим шляхом відповідно до вимог нормативних документів**

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	Значення за паспортом якості [22]	Значення згідно з	
				[20]	[17]
1	Теплота згоряння вища:				
	- стандартні умови	МДж/м ³	36,71	36,66	36,72
	- нормальні умови	МДж/м ³	-	39,34	39,41
2	Теплота згоряння нижча:				
	- стандартні умови	МДж/м ³	33,08	33,02	33,07
	- нормальні умови	МДж/м ³	-	35,45	35,51

- різний діапазон теплоти згоряння, а особливо – його верхньої межі;
- максимальні значення вмісту деяких компонентів, вказаних у Проекті [4], у т. ч. і порівняно з європейськими [24] та російськими стандартами [22]:
 - діоксиду вуглецю,
 - меркаптанової сірки,
 - механічних домішок.

Наприклад, природний газ Гадяцького родовища [25] з достатньо великим вмістом важких вуглеводнів характеризується вищою теплою згоряння $H_S^\circ(25/0^\circ\text{C}) = 42,64$ МДж/м³ і $H_S^\circ(25/20^\circ\text{C}) = 39,73$ МДж/м³. Наведені значення менші за максимальні нормативні величини відповідно до Проекту регламенту природного газу [4] – $H_S^\circ(25/0^\circ\text{C}) = 48,38$ МДж/м³ і $H_S^\circ(25/20^\circ\text{C}) = 44,94$ МДж/м³. Однак, вони є дещо вищими за значення, які наведено в Кодексі [3]: $H_S^\circ(25/0^\circ\text{C}) = 41,1$ МДж/м³ і $H_S^\circ(25/20^\circ\text{C}) = 38,3$ МДж/м³.

Ще однією проблемою є значне збільшення молярної частки діоксиду вуглецю у Проекті технічного регламенту [4] – до 6%. Чинний Кодекс газотранспортної системи регламентує цю частку на рівні 2,0% [3], як і у ГОСТ 5542-87 колишнього СРСР [6]. У Російській Федерації [22] ця молярна частка становить 2,5%. Це означає, що майже 10% у складі природного газу в Україні зможуть займати негорючі компоненти – сполуки азоту (до 5% згідно з вимогами [3]) і вуглецю. Зазвичай, їх слід попередньо видалити з метою зменшення витрат на транспортування мережею магістральних газопроводів.

У роботі [13] автором досліджено газ, що надходить газопроводом Шебелинка-Харків до міста Харкова та Харківської області. Унаслідок недостатньої підготовки до транспортування та незадовільного стану газорозподільних мереж він має незадовільну якість згідно з [3, 4]. Цей газ містить вуглеводного конденсату 30...50%, пластової води 40...70%, механічних домішок 5...15%, мінеральних солей 3...6%,

продуктів корозії 0,5...1,2%.

Виникає необхідність створити експертно-моделювальну систему для аналізу процесу накопичення факторів, які впливають на якість природного газу. Для цього використано математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної [26...28]. Цей метод як пов'язана сукупність математичних моделей дозволяє застосовувати експертно-лінгвістичну інформацію для оцінки якості природного газу залежно від факторів, що її обумовлюють.

На системному рівні лінгвістичну змінну $A_{янг}$, що характеризує якість природного газу, можна представити співвідношенням [29]

$$A_{янг} = f(X, Y, Z), \quad (1)$$

де $X = f_x(x_1; x_2)$ – лінгвістична змінна (ЛЗ), яка описує фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу; $Y = f_y(y_1; y_2; y_3; y_4; y_5; y_6; y_7; y_8; y_9)$ – ЛЗ, що описує якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування; $Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6; z_7)$ – ЛЗ, яка описує технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту; $x_1 = f_{x1}(s_1; s_2; s_3; s_4; s_5)$ – ЛЗ «вміст вуглеводнів у складі природного газу»; $x_2 = f_{x2}(b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6)$ – ЛЗ «вміст шкідливих компонентів у складі газу»; $y_1 \dots y_9, z_1 \dots z_7, s_1 \dots s_5$ і $b_1 \dots b_6$ – див. табл. 4.

Значення лінгвістичних змінних $y_1 \dots b_6$ оцінюються за допомогою системи якісних термів, які наведено в табл. 4. Для факторів впливу на якість природного газу універсальні множини (табл. 4) вибрано відповідно до Кодексу газотранспортної системи [3] та Технічного регламенту природного газу [4]. Запропонована модель нечіткого логічного висновку [30] разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – якості природного газу – залежно від кількісних та якісних факторів.

Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Позначення та назва змінної [29]	Універсальна множина	Терми для оцінки
s_1 – вміст метану (CH_4)	80...98 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
s_2 – вміст етану (C_2H_6)	1...7 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
s_3 – вміст пропану (C_3H_8)	0...3 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
s_4 – вміст бутану (C_4H_{10})	0...2 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
s_5 – вміст пентану та інших вуглеводнів (C_5H_{12})	0...1 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_1 – вміст сірководню (H_2S)	0...20 мг/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_2 – вміст азоту (N_2)	1...5 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_3 – вміст діоксиду вуглецю (CO_2)	0...6 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_4 – вміст кисню (O_2)	0...1 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_5 – вміст механічних домішок	1...10 г/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_6 – вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа)	-8...0 °С	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
y_1 – очищення від сірководню (H_2S)	0...20 мг/м ³	повна (Пв), часткова (Ч), відсутня (Вд)
y_2 – очищення від азоту (N_2)	0...5 %	повна (Пв), часткова (Ч), відсутня (Вд)
y_3 – очищення від діоксиду вуглецю (CO_2)	0...6 %	повна (Пв), часткова (Ч), відсутня (Вд)
y_4 – очищення від кисню (O_2)	0...0,02 %	повна (Пв), часткова (Ч), відсутня (Вд)
y_5 – очищення від механічних домішок	0...1 мг/м ³	повна (Пв), часткова (Ч), відсутня (Вд)
y_6 – очищення від вологи	-8...0 °С	повна (Пв), часткова (Ч), відсутня (Вд)
y_7 – число Воббе вище (стандартні умови)	44,9...53,7 МДж/м ³	низьке (Н), середнє (С), високе (В)
y_8 – теплота згоряння вища (стандартні умови)	35,4...38,3 МДж/м ³	низька (Н), середня (С), висока (В)
y_9 – відносна густина природного газу	0,55...0,75	низька (Н), середня (С), висока (В)
z_1 – вміст сірководню (H_2S)	0...6 мг/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_2 – вміст азоту (N_2)	0...5 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_3 – вміст діоксиду вуглецю (CO_2)	0...6 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_4 – вміст кисню	0...1 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_5 – вміст механічних домішок	0...1 мг/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_6 – вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа)	-8...0 °С	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_7 – вміст меркаптанової сірки	0...20 мг/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)

Висновки. Незважаючи на високу енергетичну і хімічну цінність природного газу, екологічність та відносну дешевизну порівняно з іншими видами палива, в Україні до сьогодні відсутній систематизований підхід до оцінювання його якості з урахуванням усіх технологічних процесів у ланцюгу «видобування – транспортування – використання» цього палива. На основі проведених досліджень встановлено чинники, що характеризують кількісні та якісні параметри фізико-хімічних властивостей видобутого з родовища природно-

го газу, підготовки (очищення) природного газу для транспортування та технічних умов експлуатації газорозподільних мереж населеного пункту і виконано їхню формалізацію та ієрархічну класифікацію.

У подальшому розроблена методика визначення рівня якості природного газу як енергоносія, яка ґрунтується на врахуванні компонентного складу і всіх його фізико-хімічних властивостей, дозволить запровадити розрахунки на ринку природного газу в одиницях енергії.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Схвал. розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. №605-р.
2. Використання природного газу в Україні, 1017-2018 рр., млрд. м³. [Електронний ресурс]. – URL: <https://dtek.com/content/files/rinok-prirodnogo-gazu.pdf>
3. Кодекс газотранспортної системи. – Затвердж. Постановою НКРЕКП №2493 від 30.09.2015 [Електронний ресурс]. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15>
4. Постанова КМУ «Про затвердження Технічного регламенту природного газу» 08.05.2019. [Електронний ресурс]. – URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245366216&cat_id=167475
5. ДБН В.2.5-20-2018. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Газопостачання. – Чинні від 01.07.2019. – Київ: Укрархбудінформ, 2019. – 109 с.
6. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – Дата введения 01.01.1988. – Москва: Изд.-во стандартов, 1987. – 2 с.
7. Якість газу. [Електронний ресурс]. – URL: http://utg.ua/utg/business_info/yakist-gazu.html
8. Протокол №10-4(ГР)-2019 засідання Громадської ради при Міністерстві енергетики та вугільної промисловості України від 2 липня 2019 року. [Електронний ресурс]. – URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/printable_article?art_id=245383088
9. Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до договору про заснування Енергетичного Співтовариства: закон України: станом 1.01.2019 р. – № 2787-VI (2787-17) від 15.12.2010. – Київ: ВВР, 2011, №24, ст.170.
10. Ціна на газ для побутових споживачів [Електронний ресурс]. – URL: <https://energy.kyivgaz.ua/ofitsijna-informatsiy a/tsini-ta-tarifi-na-gaz.html>
11. Тарифи. КИЇВЕНЕРГО. Офіційний сайт для клієнтів [Електронний ресурс]. – URL: https://kyivenergo.ua/dtek_kem_home/tarifi_home
12. Гордієнко А. І. До питання переходу на облік природного газу як енергоносія / А. І. Гордієнко, І. Г. Богомолець, М. В. Чуб // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №3. – с. 42-43.
13. Капцова Н. І. Підвищення ефективності експлуатації та ремонту міських газопроводів: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.23.03 / Капцова Н. І.; Міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет будівництва і архітектури. – Харків, 2018. – 20 с.
14. Козій В. М. Якість газу родовищ України / В. М. Козій, А. І. Лур'є, І. А. Рубанова // Питання розвитку газової промисловості України: наук.-виробн. збірн. УкрНДІгаз. – Вип. 28. – 2000. – с. 66-68.
15. Мотало А. В. Аналіз основних проблем методології оцінювання якості вуглеводневих газів / А. В. Мотало, Б. І. Стадник, В. П. Мотало // Науковий вісник НЛТУ України: збірн. наук.-техн. праць. Екологія та довкілля. – 2015. – Т. 25. – №10. – с. 178-183. <https://doi.org/10.15421/40251027>
16. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. – Чинний з 01.01.2011 р. – Держспоживстандарт України, 2010. – 29 с.
17. ДСТУ ISO 6976:2009. Природний газ. Обчислення теплоти згорання, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу. – Чинний з 1.01.2011. – Держспоживстандарт України, 2010. – 53 с.
18. ISO 6976:2016. Natural gas. Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition. – Third edition 15.08.2016. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/920813/>
19. ГОСТ 22267-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. – Дата введения 01.07.1983. – Москва: Изд.-во стандартов, 1983. – 63 с.
20. ГОСТ 31369-2008 (ISO 6976:1995). Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. – Дата введения 01.01.2010. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 54 с.

21. Видобуток газу в Україні в 2015-2018 рр., млрд. м³. [Електронний ресурс]. – URL: www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/DD0A8D483883B3E4C22583900050AD0C
22. Паспорт качества №4. Газ горючий природный. СТО Газпром 089-2010. – ОАО «Севернефтегазпром». Газовый промысел Южно-Русского нефтегазоконденсатного месторождения. – Апрель 2019 г. [Електронний ресурс]. – URL: <https://ОАО Севернефтегазпром Южно-Русского НГМ ГИС5383602633016703924.pdf>
23. Предун К. М. Удосконалення обліку природного газу абонентами житлових будинків / К. М. Предун, О. М. Шевчук // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник*. – 2016. – Вип.19. – с. 82-86. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2016.19.82-86>
24. Петришин І. Аналіз показників якості природного газу, які впливають на процес горіння / І. Петришин, В. Соколовський, Н. Петришин, І. Дарвай // *Стандартизація, сертифікація, якість*. – 2012. – №3. – с. 51-56.
25. Єнін П. М. Газопостачання населених пунктів і об'єктів природним газом: навч. посібн. / П. М. Єнін, Г. Г. Шишко, К. М. Предун. – Київ: Логос, 2002. – 196 с.
26. Митюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ–Винница, 2002. – 145 с.
27. Ротштейн А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. Ротштейн, С. Штовба. – Винница: Континент – ПРИМ, 1997. – 142 с.
28. Nikola K. Kasabov. Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering / Nikola K. Kasabov. – London, England, Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book, The MIT Press, 1998. – 538 p. – ISBN 0-262-11212-4.
29. Франчук Ю. Й. Оцінка якості природного газу як енергоносія на основі лінгвістичної інформації / Ю. Й. Франчук, О. І. Ободяньська, К. М. Предун // *Управління розвитком складних систем*. – 2019. – № 38. – С. 143-150. – <http://doi.org/10.6084/m9.figshare.9788615>.
30. Предун К. М. Модель багатофакторної оцінки якості природного газу / К. М. Предун, Ю. Й. Франчук, О. І. Ободяньська // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 30. – с. 20-28. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.30.20-28>

References

1. *Enerhetychna stratehiya Ukrainy na period do 2035 r. «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist»*. – Skhval. rozporядzhennyam KМУ vid 18.08.2017. №605-r.
2. *Vykorystannya pryrodnoho hazu v Ukraini, 2017-2018 rr., mlrd. m3*. URL: <https://dtek.com/content/files/rinok-pryrodnoho-gazu.pdf>
3. *Kodeks hazotransportnoyi systemy*. Zatverdzh. Postanovoyu NKREKP №2493 vid 30.09.2015. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15>
4. *Postanova KМУ «Pro zatverdzhennya texnichnogo reglamentu pryrodnoho hazu»*. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245366216&cat_id=167475
5. *Inzhenerne obladnannya budynkiv i sporud. Zovnishni merezhi ta sporudy. Hazopostachannya*. DBN V.2.5-20-2018. Derzhbud Ukrainy, 2018.
6. *Hazy horyuchye pryrodnye dlya promyshlennoho y kommunal'no-bytovoho naznachennya. Tekhnicheskyye uslovyia*. GOST 5542-87. Yzd.-vo standartov, 1987.
7. *Yakist hazu*. URL: http://utg.ua/utg/business_info/yakist-gazu.html
8. *Protokol №10-4(HR)-2019 zasidannya Hromads'koyi rady pry Ministerstvi enerhetyky ta vuhil'noyi promyslovosti Ukrainy vid 2 lypnya 2019 roku*. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/printable_article?art_id=245383088
9. *Pro ratyfikatsiyu Protokolu pro pryednannya Ukrainy do dohovoru pro zasnuvannya Enerhetychnoho Spivtovarystva: zakon Ukrainy: stanom 1.01.2019. № 2787-VI (2787-17) vid 15.12.2010*. VVR. 2011. №24.
10. *Tsina na haz dlya pobutovykh spozhyvachiv*. URL: <https://energy.kyivgaz.ua/ofitsijna-informatsiy-a/tsini-ta-tarif-na-gaz.html>
11. *Taryfy. KYIVENERHO. Ofitsiynyy sayt dlya kliyentiv*. URL: https://kyivenergo.ua/dtek_kem_home/tarifi_home
12. Hordiienko A. I., Bohomolets I. H., Chub M. V. “Do pytannia perekhodu na oblik pryrodnoho hazu yak enerhosiia.” *Naftova i hazova promyslovist*. 2001. no. 3. P. 42-43.
13. Kaptsova N. I. *Pidvyshchennya efektyvnosti ekspluatatsiyi ta remontu mis'kykh hazoprovodiv*: avtoref. Diss. abstract. *Kharkivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury*. 2018.
14. Kozii V. M., Lurie A. I., Rubanova I. A. “Yakist hazu rodovyshch Ukrainy.” *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy: nauk.-vyrobn. zbirn. UkrNDIhaz*. 2000. Iss. 28. P. 66-68.
15. Motalo A. V., Stadnyk B. I., Motalo V. P. “Analiz osnovnykh problem metodolohii otsinuvannya yakosti vuhlevodnykh haziv.” *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy: zbirn. nauk.-tekhn. prats. Ekolohiia ta dovkillya*. 2015. T.25. №10. P. 178-183. <https://doi.org/10.15421/40251027>
16. *Pryrodnyi haz. Vyznachennia enerhii*. DSTU ISO 15112:2009. Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2010.
17. *Pryrodnyi haz. Obchyslennia teploty zhorannia, hustyny, vidnosnoi hustyny i chysla Wobbe na osnovi komponentnoho skladu*. DSTU ISO 6976:2009. Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2010.

18. *Natural gas. Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition* ISO 6976:2016. URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/920813/>
19. *Gazy goriuchie prirodnye. raschetnyi metod opredeleniia teploty sgoraniia, otnositelnoi plotnosti i chisla Wobbe*. GOST 22267-82. Izd.-vo standartov, 1983.
20. *Haz prirodnyj. Vychislenie teploty sgoraniya, otnositelnoj plotnosti i chisla vobbe na osnove komponentnogo sostava*. GOST 31369-2008 (ISO 6976:1995). URL: <https://dokipedia.ru/document/5337355>
21. *Vidobutok hazu v Ukraini v 2015-2018 rr., mlrd. M3*. URL: www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/dd0a8d483883b3e4c22583900050ad0c
22. *Pasport kachestva №4. Haz goriuchij prirodnyj. STO gazprom 089-2010. OAO «Severneftegazprom». Gazovyy promysel yuzhno-russkogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniia. aprel 2019*. URL: <https://oao.severneftegazprom.yuzhno-russkogo.ngm.gis5383602633016703924.pdf>
23. Predun K. M., Shevchuk O. M. “Udoskonalennia obliku pryrodnoho hazu abonentamy zhitlovikh budynkiv.” *Ventilyaciya, osvittleniya ta teplofazopostachannya: nauk.-texn. zbirnik*. 2016. Iss. 19. P. 82-86.
24. Petryshyn I., Sokolovskiy V., Petryshyn N., Darvai I. “Analiz pokaznykiv yakosti pryrodnoho hazu, yaki vplyvaut na protses gorinnia.” *Standartizaciia, sertifikatsiia, yakist*. 2012. №3. P. 51-56.
25. Yenin P. M., Shishko G. G., Predun K. M. *Hazopostachannya naselenix punktiv i obektiv pryrodnim hazom*. Logos, 2002.
26. Mitiushkin Yu. I., Mokin B. I., Rotshtein A. P. *Soft computing: identyfikaciya zakonomernostej nechekimi bazami znanij*. Universum–Vinnica, 2002.
27. Rotshtein A. P., Shtovba S. *Nechetskaya nadezhnost algoritmicheskix processov*. Kontinent-Prim, 1997.
28. Nikola K. Kasabov. *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering*. Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book, The MIT Press, 1998. ISBN 0-262-11212-4.
29. Franchuk Yu. I., Obodianska O. I., Predun K. M. “Otsinka yakosti pryrodnoho hazu yak enerhonosiia na osnovi linhvistychnoi informatsii”. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 2019, no 38, pp.143-150. <http://doi.org/10.6084/m9.figshare.9788615>.
30. Predun K. M., Franchuk Yu. Y., Obodyanska O. I. “Model bahatofaktornoyi otsinky yakosti pryrodnoho hazu.” *Ventylyatsiya, osvittleniya ta teplofazopostachannya: nauk.-tekhn. zbirnyk*. 2019. Vyp. 30. P. 20-28. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.30.20-28>

УДК 533.1:620.93:658.56

Создание экспертно-моделирующей системы для анализа факторов, влияющих на качество природного газа

Ю. Й. Франчук¹

ассистент, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, franchuk196405@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7910-8705

Аннотация. Проанализированы требования действующих в Украине нормативно-технических документов по определению показателей качества природного газа. Выполнено сравнение с аналогичными европейскими и российскими стандартами. Для комплексной оценки качества природного газа предложена методика, базирующаяся на теории нечёткой логики и лингвистической переменной. Установлены факторы, характеризующие количественные и качественные параметры физико-химических свойств добываемого с месторождения природного газа, качество подготовки (очистки) природного газа для транспортировки и технические условия эксплуатации газораспределительных сетей населённого пункта. Выполнена их формализация и иерархическая классификация. Для факторов влияния на качество природного газа универсальные множества выбраны в соответствии с требованиями действующих нормативно-технических документов, гармонизированных с европейским законодательством. Обоснован выбор важнейших физико-химических свойств природного газа для его энергетической оценки.

Ключевые слова: природный газ, компонентный состав, качество газа, физико-химические свойства, теплота сгорания, условия измерения, лингвистическая переменная, универсальное множество.

UDC 533.1:620.93:658.56

Creation of an Expert-Modelling System for the Analysis of Factors that Affect the Quality of Natural Gas

Yu. Franchuk¹

¹Assistant, Kyiv National University of Construction and Architects. Kyiv, Ukraine, franchuk196405@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7910-8705

Abstract. Natural gas is the main energy resource in our country. Its share in total primary energy supply today is about 30 %. According to the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 it is planned to remain the share at the same level. The requirements of the normative-technical documents in force in determining the quality indicators of natural gases are analysed. Gas quality is the degree of compliance of natural gas indicators with the established requirements, which is determined by its composition and physical properties. Comparison was made with similar European and Russian standards. Some of these characteristics (such as carbon dioxide content, measurement range, combustion heat values, etc.) contradict each other. A methodology based on the theory of fuzzy logic and linguistic variable is proposed for complex assessment of natural gas quality. Factors characterizing the quantitative and qualitative parameters of the physical and chemical properties of the natural gas extracted, the quality of preparation (purification) of natural gas for transportation, and the technical conditions of operation of gas distribution networks of the settlement have been established. Their formalization and hierarchical classification have been completed. For the factors of influence on the quality of natural gas universal sets are selected in accordance with the requirements of the current normative and technical documents harmonized with the European legislation. The choice of the most important physicochemical properties of natural gas for its energy evaluation is substantiated. The proposed hierarchical classification of factors affecting the quality of natural gas allows us to construct the functions of the estimation of the classified factors using linguistic variables. Belonging functions of the influencing factors on quality of natural gas are the basis for modelling of the expert system for support of management decision-making in the process of assessment and forecasting the natural gas quality

Keywords: natural gas, component composition, concentration, quality, physicochemical properties, combustion heat, measurement conditions, linguistic variable, universal sets.

Надійшла до редакції / Received 20.08.2019

УДК 745/749:628.9

Передумови і перспективи нормування штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини

Л. М. Коваль¹

¹канд. мистецтвознавства, доц., докторант. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, likocolor@gmail.com, ORCID:0000-0002-7324-0377

Анотація. У статті аналізуються такі передумови нормування штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини, як поява нових даних стосовно впливу на організм людини світлового випромінювання біологічно-активного видимого діапазону та близького інфрачервоного діапазону, а також широке впровадження LED-технологій, які потенційно є найбільш перспективними стосовно відтворення властивостей природного освітлення, синхронізації з ним та імітації виду з вікна. На основі аналізу відповідних передумов запропоновано перелік актуальних напрямків розвитку нормування штучного освітлення: регулювання наявності в спектрі освітлювальних систем випромінювання біологічно-активного видимого діапазону та близького інфрачервоного діапазону, визначення інтенсивності і тривалості дії цього випромінювання залежно від різних добових періодів; розробка методики кореляції світлових і візуальних характеристик установок штучного освітлення та дійсного виду з вікна; синхронізація освітлювальних норм з нормами щодо застосування технології Li-Fi. Питання енергоефективності систем штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини потребує більш детального розгляду в окремій публікації.

Ключові слова: нормування штучного освітлення, біоритм людини, циркадна система, LED, Li-Fi

Вступ. Під стандартизацією розуміється діяльність, спрямована на досягнення оптимального рівня упорядкованості й узгодженості в певній галузі шляхом встановлення положень для загального і багаторазового використання стосовно наявних або потенційних задач. Відповідно, раціонально організована діяльність зі стандартизації здійснюється лише згідно з результатами фундаментальних досліджень і проектних розробок, які завершилися позитивним науково-технічним результатом [1]. Тому основними передумовами для формування нових норм та стандартів у певній галузі є:

- ✓ широке впровадження нових технологій на основі попередньої апробації в рамках успішного практичного втілення;
- ✓ необхідність врахування можливих наслідків застосування цих технологій.

У галузі освітлення значні зміни відбуваються завдяки широкому застосуванню LED-технологій. Технологічні властивості світлодіодів сприяють їхній високій узгодженості зі складними системами управління освітленням. При цьому можливо керувати як інтенсивністю, так і колірною температурою світла. З точки зору потенційних можливостей забезпечення високих показників якості освітлення, ці джерела виводять галузь освітлення на принципово новий рівень. Так, на думку більшості експертів з науково-технічної політики і інвестування коштів [2], революція нано-

технологій (до яких належать і сучасні LED-технології) охопить усі життєво важливі сфери діяльності людини, а її наслідки будуть ширшими і глибшими ніж наслідки комп'ютерної революції.

Одним з найважливіших питань, пов'язаних з освітленням, є його вплив на живі організми (зокрема, на людей). Сучасні методи випробувань і вимірювань дозволяють досліджувати наслідки впливу світла набагато ретельніше. З новими можливостями LED-технологій щодо контролю колірної температури та передачі кольору ці результати набагато простіше застосовувати на практиці [3]. Наприклад, для рослин можлива зміна світлового спектра опромінення відповідно до кожного етапу їхньої життєдіяльності. Тому CIE (Commission International de l'Éclairage – Міжнародна комісія освітлення) анонсувала початок роботи над майбутньою стандартизацією ряду світлових спектрів щодо їхнього впливу на рослини. Розробляються звіти та інші публікації стосовно штучного освітлення у садівництві [4].

Для позначення освітлення, яке б ураховувало вплив світла на організм і життєдіяльність людини, використовуються різні дефініції, які мають певні нюанси у визначеннях. У цьому контексті вживають вираз «біологічно ефективне освітлення», але поняття «біологічний» охоплює і візуальні процеси. Термін «динамічне освітлення» широко використовується,

якщо колірна температура і освітленість змінюються відповідно до денного світла задля впливу на циркадні ритми людини. Проте, цим же терміном позначається світло, яке змінюється (наприклад, у кольорі), але не має біологічного впливу. Вираз «циркадне освітлення» застосовується, коли освітлення призначене для корекції або стабілізації циркадного ритму людини [4]. Останні декілька років особливого поширення набув термін «орієнтоване на людину освітлення» [5; 6]. Він стосується освітлення, яке відповідає індивідуальним умовам життя та роботи користувача в будь-який час, причому воно задовольняє не лише візуальні вимоги, але й впливає на людину емоційно та біологічно [5].

У даній статті досліджується освітлення, яке підтримує, а не коригує циркадний ритм людини. Стаття базується на положенні, що будь-яке освітлення середовища життєдіяльності людини призначене для задоволення її потреб, а тому є орієнтованим на неї. Таким чином, відповідне штучне освітлення (таке, що враховує вплив світла на організм і життєдіяльність людини) розглядається як освітлення, узгоджене з біоритмами людини.

Перехід на світлодіодні джерела світла та розробка інтелектуальних систем керування освітленням не лише забезпечують високу енергоефективність світлових рішень, а й відкривають абсолютно нові можливості для підтримки функціональних, емоційних та біологічних потреб людини. Пріоритетність використання природного освітлення (з урахуванням додаткового навантаження на системи охолодження в теплий період року), автоматичне налаштування системи штучного освітлення залежно від добових змін денного світла та наявності детекторів присутності значно знижують (до 35%) споживання енергії. З огляду на це, якість освітлення та його енергоефективність не можуть протиставлятися [3].

Актуальність дослідження. Зміни норм є безперервним процесом. Тому важливими питаннями є їхня відповідність [7]

- ✓ сучасному етапу розвитку країни;
- ✓ нормам провідних країн світу.

Першочерговим завданням удосконалення штучного освітлення є впровадження енергоефективних джерел світла [8]. На сьогодні в чинному ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» надана можливість використання як джерел світла світлодіодів як для освітлення міських просторів, так і для загального освітлення приміщень [9]. Наступним кроком у

нормуванні повинна стати низка стандартів та настанов з проектування освітлення, узгодженого з біоритмами людини. У деяких країнах подібні документи вже прийнято, наприклад, DIN SPEC 5031-100 [10], DIN SPEC 67600 [11]. В основу повинен бути покладений системний підхід до вибору принципів проектування світлодіодного освітлення, який дозволить мінімізувати ризики щодо безпеки і здоров'я людини. Сутністю цього підходу є всебічна оцінка ефективності освітлювальних приладів і рівня впливу їхнього випромінювання (у різних діапазонах частот) як на здоров'я людини, так і на середовище її життєдіяльності [8].

Загалом, перехід суспільства до цифрових LED-технологій в освітленні – це зміна парадигми, яка відбувається швидкими темпами і стосується не лише візуального сприйняття та енергетичної ефективності, але й оптимізації біологічного та емоційного впливу світла [5]. Ця тенденція актуалізує необхідність більш повного врахування не візуальних світлових ефектів у відповідних нормативних актах.

Останні дослідження та публікації. Дійсні масштаби залежності організму людини від освітлення стали очевидними лише протягом останніх десятиліть. На важливість досліджень, пов'язаних з впливом світла на біологічний годинник людини, вказує те, що у 2017 р. Джефрі К. Холл, Майкл Росбаш та Майкл У. Янг (Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash and Michael W. Young) були удостоєні Нобелівської премії з медицини за роботу над механізмом, відомим як «циркадний ритм» [12; 13; 14]. Відкриття гангліозних клітин (ipRGC – внутрішні фотоочутливі гангліозні клітини сітківки [14]), чутливих до синіх спектральних довжин хвиль, і механізму їхнього функціонування викликало різке зростання досліджень фотобіології та психології, особливо в області циркадного регулювання [15].

Зростає кількість джерел, які вказують на те, що світло через циркадний ритм може впливати як на продуктивність, так і на здоров'я людей [16, с. 85-87]: сезонне скорочення кількості денного світла взимку в крайніх північних та південних широтах може викликати депресію – сезонний афективний розлад (САД) або «зимову меланхолію»; добове чергування світла і темряви значно впливає на якість сну, крайні випадки порушень якого діагностуються як синдром затримки сну.

У багатьох дослідженнях останніх років висловлюється занепокоєння щодо впливу синього світла на біологічний годинник людини у ве-

чірній та нічний період доби і виникнення через це циркадних порушень. Проблема стосується галузі освітлення загалом, і, зокрема, електронних дисплеїв. Адже типові дисплеї з корельованою колірною температурою близько 6500 К та інтенсивним синім піком забезпечують значну циркадну стимуляцію. Тому використання дисплеїв напередодні сну може негативно впливати на його якість. Однак, застосування світлодіодних технологій з мінімальним вмістом синього кольору у загальному спектрі їхнього світлового випромінювання забезпечує шлях до успішного вирішення цієї проблеми [17; 18]. В окремих публікаціях акцентується увага на особливому значенні для нормального функціонування організму людини випромінювання ближнього інфрачервоного спектрального діапазону [19].

Важливою подією в галузі нормування освітлення став вихід нового європейського стандарту щодо природного освітлення будівель EN-17037 [20; 21]. У контексті даного дослідження найважливішим нововведенням цього стандарту є уніфікація критеріїв оцінки внутрішнього природного освітлення і штучного освітлення заміною коефіцієнта природного освітлення (КПО) на абсолютні значення освітленості відповідно до різноманітних зорових завдань, як це прийнято відносно штучного внутрішнього освітлення [22]. Це може слугувати першим кроком до синхронізації показників природного і штучного світла у системах суміщеного освітлення, які є одним з основних засобів забезпечення освітлення, узгодженого з біоритмами людини.

Практична апробація положень щодо біологічно ефективного та орієнтованого на людину освітлення на рівні втілених проектів в основному стосується медичних закладів, серед яких будинки для літніх людей [6; 23], та шкільних приміщень [24]. З огляду на те, що природне освітлення традиційно вважається найбільш сприятливим для комфортного самопочуття людини, зростає кількість установок штучного освітлення, що його імітують [25-29]. Дослідження в цьому напрямку проводяться переважно виробниками таких імітаційних систем [30]. Однак, на сьогодні повне узгодження світлових і візуальних характеристик штучної системи освітлення як з динамікою природного світла, так і з динамікою дійсного виду з вікна, при одночасному застосуванні з системою природного освітлення не забезпечується.

Під енергоефективністю слід розуміти відношення вихідної продуктивності, послуг,

товарів або енергії до вхідної енергії [31]. Тоді чим більшою є кількість функцій, які здатна виконувати одна освітлювальна установка без значного підвищення енерговитрат, тим більш енергоефективною вона є. З огляду на це, можна прогнозувати подальше поєднання функцій освітлення та бездротової комунікації Li-Fi в межах одного світлодіодного світильника.

Формування цілей статті. Метою статті є визначення перспектив стосовно нормування штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини, на основі аналізу відповідних передумов такого розвитку норм з освітлення.

Основна частина. Освітлювальна промисловість останніх кількох років орієнтована на створення продуктів, здатних позитивно впливати на циркадний ритм людини (наприклад, [32]). Такі освітлювальні системи, як правило, сприяють високій світловій стимуляції вранці та обмежують її за кілька годин до сну [17]. Циркадний ритм людини, синхронізований із сонячним добовим циклом, регулює не лише періоди активності та відпочинку, біоритми, а й фізіологічні функції на клітинному рівні [16, с. 80-87]. На рис. 1 подано декілька етапів циркадного біологічного годинника людини [13].



Рис. 1. Етапи циркадного біологічного годинника людини [13]

Донедавна вважалося, що сприйняття світла (фоторецепція) відбувається тільки за допомогою двох видів клітин сітківки – палички і колбочки. Однак, сучасні фотобіологи ідентифікували внутрішні фоторецепторні гангліозні клітини сітківки (ipRGCs), максимально чутливі до синьо-блакитного світла, з піком близько 460-490 нм [17]. Палички і колбочки виявляють форму й колір та передають цю інформацію візуальній корі. ipRGCs виявляють опромінення і спрямовують свою інформацію до багатьох структур мозку, серед яких найретельніше вивчене супрахізматичне ядро гіпоталамуса. Завдяки сигналам «світла і темряви», що до нього надходять, цим ядром контролюється вироблення гормону мелатоніну, яким регулює-

ться циркадний ритм. Таким чином, світло, одержуване оком, перетворюється на нейронні сигнали, які проходять через оптичний нерв двома шляхами, один – візуальний, другий – невізуальний [15]. Тому при оцінці доречності будь-якого способу освітлення слід враховувати фізичні властивості світла, які по-різному впливають на дві біологічні системи людини – візуальну та циркадну. Порівняно з візуальною системою, яка є основою звичайної фотометрії, для активації циркадної системи необхідний значно вищий рівень освітлення сітківки, довший часовий проміжок впливу, а її чутливість до світла залежить від часу доби [16].

Напрямок, за яким світло потрапляє в очі, є особливо важливим для забезпечення біологічного впливу. Поле зору людини в закритих приміщеннях має кутовий діапазон близько 70° нижче лінії видимості і до 55° вище лінії видимості. Найчастіше лінія зору спрямована вниз, оскільки візуальне завдання, зазвичай, зосереджене в нижній частині поля зору. Оскільки освітлення в межах візуального завдання в першу чергу повинно відповідати візуальним вимогам, не рекомендується планувати у цій області додаткове освітлення для забезпечення біологічного впливу. Якщо врахувати, що чутливість фоторецепторів до біологічних світлових ефектів вище в нижній області сітківки (рис. 2), то діапазон найвищої біологічної ефективності світла становить від мінус 15° до 45° [5].

З огляду на це, при проектуванні систем штучного освітлення рекомендується зосереджувати велику кількість світла у верх-

ній частині поля зору. Цього можна досягти використанням:

- великих світлових площ (наприклад, світлових стель);
- світильників непрямого світла, які освітлюють стелю і верхню третину стін;
- підсвічування світлорозсіювальних матеріалів у світних стінах і декоративному оздобленні інтер'єру;
- непрямого світла в меблях і предметному наповненні приміщення [3].

На сьогодні, основним підходом щодо кількісної оцінки впливу штучного світла на циркадну систему є обчислення ефективної кількості циркадної стимуляції шляхом порівняння спектра випромінювання джерела з так званим циркадним спектром дії $S_{mel}(\lambda)$. Результат такого розрахунку називають меланопічним люксом за аналогією з відомим люксом за кривою $V(\lambda)$ фотопічної чутливості (рис. 3). Два джерела однакової освітленості можуть мати різний меланопічний люкс, який вказує на відносний потенціал впливу цих джерел на циркадну систему [17].

Для підтримки циркадного ритму важливо, щоб меланопічний рівень ранкового і денного освітлення був вищим ніж увечері. Для цього впродовж декількох ранкових годин повинна забезпечуватися освітленість ока $300...500$ лк з колірною температурою не менше 5500 К. За дві години до сну рекомендується рівень освітленості ока до 50 лк, а колірна температура – $2700...3000$ К з мінімізованими синіми компонентами світлового спектра [5].

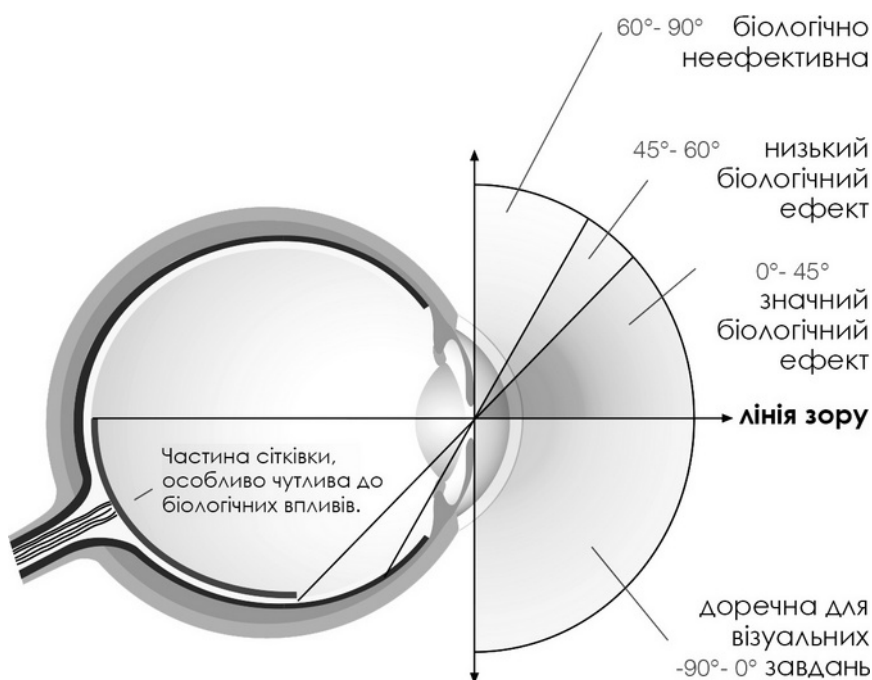


Рис. 2. Чутливість фоторецепторів (за [5, с. 19])

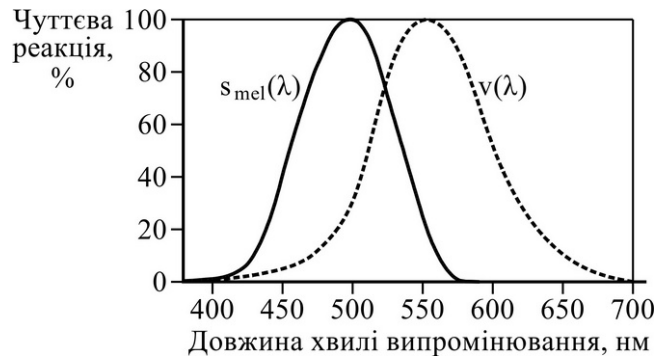


Рис. 3. Функції спектральної чутливості [3]:

Критичні значення для меланопічного рівня, люкс, на оці такі: для активації – понад 250 меланопічних люкс; для релаксації – менше 100 меланопічних люкс [14]. Мінімальні значення меланопічного номінального рівня освітленості ока згідно з DIN SPEC 5031-100 наведено в табл. 1. Також зазначено коефіцієнт перетворення, що дозволяє конвертувати фотометричне значення в номінальне значення меланопічного люкса [5].

Ефективним методом підтримки циркадного ритму є оптимізація рівнів природного освітлення у випадках його недостатньої кількості за рахунок доповнення світлом штучних джерел [6]. Світлодіоди забезпечують необхідний світловий спектр і є легко керованими за допомогою інтелектуальних систем управління [3]. У зв'язку з цим значно зросло значення суміщеного освітлення [42].

При проектуванні суміщеного освітлення спірним моментом є визначення єдиного критерію оцінки природного і штучно освітлення. У чинних нормах визначена величина коефіцієнта природного освітлення в системі суміщеного освітлення [9]. Однак, у розрахункову точку приміщення надходить як природне світло, так і світло від штучних джерел. Тому, має бути єдиний параметр, який характеризує загальну насиченість світлом у точці. Він залежить від характеру зорової роботи, контингенту людей,

тривалості їхнього перебування в цьому приміщенні тощо [42].

Тим часом, новий європейський стандарт щодо природного освітлення будівель EN-17037 пропонує уніфікацію критеріїв оцінки внутрішнього природного і штучного освітлення заміною коефіцієнта природного освітлення на абсолютні значення освітленості відповідно до різноманітних зорових завдань. Також цим стандартом передбачена можливість використання в приміщеннях з недостатнім природним освітленням додаткового штучного освітлення.

При суміщенні природного і штучного освітлення останнє повинно бути адаптованим до природного. Імітація природного освітлення за допомогою штучних джерел світла вимагає створення установок, спроможних забезпечити світлові умови, близькі до мінливого природного освітлення з відповідним впливом на організм людини [22].

Протягом дня природне освітлення всередині будівель безперервно змінюється як за інтенсивністю, так і за просторовим розподілом. Основними джерелами світла при цьому є сонце і небо [22]. Тому яскравість денного світла значно змінюється не лише залежно від часу доби, але і від географічного положення, погоди та сезону [3].

Таблиця 1

Витяг з DIN SPEC 5031-100 - конвертаційне значення $m_{v, mel, D65}$, яке дозволяє перетворювати фотометричне значення фотопічної чутливості згідно з кривою $V(\lambda)$ у відповідне номінальне значення меланопічного люкса [5]

Джерело світла	Конвертаційне значення $m_{v, mel, D65}$ (залежить від спектра джерела світла)	Приклад освітленості ока	Номінальний меланопічний рівень освітленості ока
LED, 2.700 K	0,41	50 лк	20 лк
LED, 4.000 K	0,63	380 лк	240 лк
LED, 6.500 K	0,80	300 лк	240 лк
Люмінесцентна лампа, 8.000 K	0,96	250 лк	240 лк

Результати довготривалих вимірювань яскравості неба і природної освітленості, які проводилися через певні проміжки часу в різних точках земної кулі, дозволили описати світловий клімат в усьому світі. Тому в області природного освітлення розширення кількості варіантів стандартного неба від похмурого до ясного була успішно реалізована.

Отримано 15 типів неба, які на сьогодні прийняті і CIE і Міжнародною організацією щодо стандартизації (ISO) [22]. Ці результати можуть бути використані для вдосконалення систем штучного освітлення, націлених на відтворення природної динаміки денного світла за допомогою автоматизованих системи контролю. Ці системи самостійно враховують час доби протягом року і широту місцевості [14]. Сучасні програми управління динамічним освітленням використовують переважно зміни освітленості та кольорової температури [3; 17]. Також у приміщеннях постійного перебування людей має забезпечуватися відповідний вид назовні, який ділиться на три стандартні категорії: вид на небо, вид на ландшафт і вид на землю.

Найважливішою для зору людини категорією є вид на небо, оскільки акомодация очей на нескінченність і колір неба стимулює діяльність різних органів [22]. Різні варіанти сучасних систем світлодіодного освітлення забезпечують імітацію усіх категорій виду з вікна. Однак, на сьогодні поки що не вирішеним залишається питання гармонійного узгодження світлових і візуальних параметрів цих імітаційних систем з дійсними світловими і візуальними параметрами системи природного освітлення, якщо вона також використовується у даному приміщенні.

За вищезазначеним можна констатувати, що чим краще штучне освітлення імітує денне світло, тим приємнішим і досконалішим воно відчувається людьми [14]. Відповідні меланопічні ефекти при цьому досягаються такими основними шляхами [3]:

- ✓ вищою освітленістю;
- ✓ вищим вмістом випромінювання синього діапазону в загальному спектрі;
- ✓ змінним у часі динамічним освітленням;
- ✓ правильним часом дії (адже біологічний невізуальний вплив світла найбільш ефективний вранці і може бути шкідливим для циклу сну-бадьорості ввечері).

Окрім даних щодо впливу світла (діапазон активності 420-500 нм) на мелатонін, який виробляється шишкоподібною залозою, на сьогодні також відомо, що в багатьох клітинах мелатонін виробляють мітохондрії. С. Ціммерман і Р. Дж. Райтер (S. Zimmerman and R. J. Reiter) припускають [19], що субклітинний мелатонін виробляється у відповідь на фотони ближнього інфрачервоного випромінювання (діапазон активності 650...1200 нм), які становлять більшість (з точки зору фотохімії понад 70 %) сонячного світла. Дослідження проводилося за допомогою тривимірних механістичних біооптичних моделей шкіри, очей і мозку, що базувалися на застосуванні не послідовного трасування оптичних променів і даних електронного спінового резонансу (наданих Zastrow [33; 19]).

У результаті зроблено висновок, що близький інфрачервоний спектральний діапазон природного сонячного світла впливає на 60 % клітин у дорослому тілі і 100 % клітин у плода і маленьких дітей. Другим висновком є те, що людський організм розробив оптичні механізми для збору та локалізації фотонів близького інфрачервоного діапазону, які можуть проникати вглиб тіла людини в середньому не менше ніж на 8 см, тоді як фотони ультрафіолетового і видимого діапазонів оптично локалізуються на зовнішніх поверхнях. Моделі продемонстрували, що діти та плід мають більш високі рівні впливу ближнього інфрачервоного випромінювання на мозок і внутрішні органи, порівняно з дорослими. Цей оптичний ефект необхідно враховувати в когнітивних та навчальних ситуаціях [19].

На рис. 4 наведено порівняння оптичних моделей темної шкіри з високим вмістом меланіну (43 %) та світлої шкіри з низьким вмістом (1,3 %) під дією опромінення фотонами ближнього інфрачервоного діапазону [19].

Також С. Ціммерман і Р. Дж. Райтер висловлюють думку, що велика кількість випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону від теплових джерел взагалі, та полум'я зокрема, повинна бути корисною для здоров'я людини, оскільки з самого початку культурного і цивілізаційного розвитку це перше штучне джерело світла супроводжувало еволюцію людства. Однак, якщо звернутися до міфів, які за К. Юнгом є виразниками колективного несвідомого [34], то можна констатувати, що оцінка стародавніми людьми впливу вогню на їхній психофізіологічний добробут не була однозначною.

Історичною основою для появи міфу про Прометея могла слугувати еволюція первісного суспільства, перехід людини до цивілізації [35].

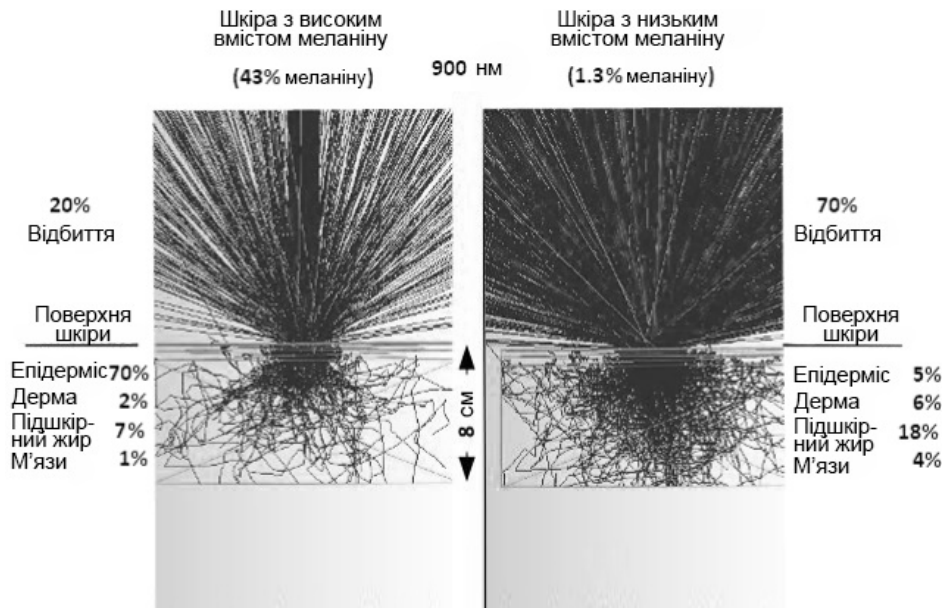


Рис. 4. Оптичні моделі шкіри з різним вмістом меланіну (за [19])

Якщо трактувати жест передачі людям вогню Прометеем як каталізатор чи наслідок появи в результаті еволюційного розвитку якоїсь нової, особливої функції в роботі людського мозку, то, згідно зі змістом міфу [36], це означало:

1. Позитивні зрушення в культурному, соціальному, когнітивному напрямку [36].

2. Негативні наслідки на фізіологічному рівні і для Прометейя [36], і для людей [36].

Таким чином, вважати корисною у період після заходу сонця велику кількість ближнього інфрачервоного випромінювання, аналогічного до випромінювання полум'я та теплових джерел (наприклад, ламп розжарювання), передчасно. Полум'я подовжило світловий день людини, створило умови для спілкування, обміну досвідом та зародження суспільства як такого, проте фізіологічний вплив його оптичного випромінювання на людський організм поки що вивчений недостатньо. А як нестача, так і надлишок будь-якого випромінювання оптичного діапазону може бути шкідливим.

З іншого боку, якщо спиратися на природне денне освітлення (світло сонця і небозводу) як на найбільш сприятливе і безпечне для людини, то необхідно визнати важливість [19] присутності у приміщеннях достатньої кількості ближнього інфрачервоного випромінювання у період від сходу і до заходу сонця, не залежно від застосовуваного виду (природне, суміщене чи штучне) освітлення.

Під природним сонячним світлом фотони ближнього інфрачервоного випромінювання забезпечують захист від пошкоджень, індукованих на основі щільності утворення

вільних радикалів фотонами як ультрафіолетового, так і видимого діапазону. Оскільки всі біооптичні процеси в організмі мають фотохімічну природу, то відповідно до дози опромінення 8 годин перебування в офісі (750 лк) сприяє утворенню такої ж кількості вільних радикалів, як і 30 хвилин перебування на сонці (76000 лк). Але природне світло сонця з високим вмістом фотонів ближнього інфрачервоного випромінювання забезпечує пропорційну та локальну реакцію, стимулюючи антиоксидантну реакцію організму [19]. А сучасні системи штучного освітлення, орієнтовані на забезпечення світлового випромінювання виключно видимого діапазону, позбавлені цього компенсаторного механізму.

Наукове припущення стосовно того [19], що внутрішньоклітинний мелатонін, який виробляється під дією ближнього інфрачервоного випромінювання, нейтралізує дію вільних радикалів, які утворюються в тканинах людини не лише під дією ультрафіолетового випромінювання, а й під впливом випромінювання видимого діапазону, може підтвердитися в майбутніх дослідженнях. Тоді, згідно з цією гіпотезою, для забезпечення такого ж позитивного впливу на організм людини при штучному освітленні, як і при природному освітленні, кількість ближнього інфрачервоного випромінювання повинна бути достатньою для нейтралізації шкідливої дії оптичного випромінювання штучних джерел світла.

У майбутньому наслідком такого підходу повинен стати більш широкий погляд на циркадну систему з урахуванням як мелатоніну, що циркулює, так і субклітинного мелатоніну:

мелатонін, що циркулює, стимулюється відсутністю світла (“Hormone of Darkness”), а субклітинний мелатонін може бути стимульований наявністю світла (“Hormone of Daylight”). Опієнтовні співвідношення оптичної потужності ближнього інфрачервоного до видимого діапазону становлять: 3/1 – при сході сонця, 1/1 – опівдні, 3/1 – на заході сонця, 10/1 – для багаття та теплових джерел світла [19].

Відповідно до базового положення, що чим краще штучне освітлення повторює якості природного світла, тим сприятливішим воно є для комфортного самопочуття людини, системи штучного освітлення мають містити окрім джерел видимого випромінювання також джерела випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону. При цьому пропорційні співвідношення їхньої оптичної потужності повинні повторювати вищенаведені співвідношення для природного світла відповідно до різних добових періодів. Сучасні LED-технології здатні забезпечити таку вимогу, адже пропонують широку різноманітність світлодіодів з випромінюванням у ближньому інфрачервоному діапазоні (рис. 5).

Завдяки застосуванню світлодіодів з високою яскравістю як джерел для освітлення, з'явилася можливість створення бездротових мереж на основі технології Li-Fi. Це технологія бездротового зв'язку використовує інфрачервону і видиму частини оптичного діапазону електромагнітного спектра для високошвидкісної передачі даних [38]. На сьогодні технологія Li-Fi вже застосовується на практиці (наприклад, [39]) та вважається дуже перспективною. Адже загальний спектральний діапазон інфрачервоного і видимого випромінювання приблизно в 2600 разів більше, ніж весь радіочастотний діапазон [38]. Крім цього, відсутність шкоди для здоров'я від електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону на сьогодні не доведена. Винахідником технології Li-Fi і просторової модуляції, яка лежить в основі принципу її дії, є професор Харальд Хаас (Harald Haas) [40].

Необхідно зазначити, що технологічні рішення у світлодіодному освітленні, які є сприятливішими для освітлювальних систем, синхронізованих з біоритмами людини, є доречнішими і для освітлення з додатковою функцією Li-Fi. Так, у Li-Fi швидкість передачі даних залежить як від застосованої технології цифрової модуляції, так і від технології освітлення. Набагато швидша передача забезпечується при утворенні сумарного білого світла за рахунок оптичного змішування випромінювання

червоного, зеленого та синього (RGB) світлодіодів (порівняно зі швидкістю передачі даних при використанні білих світлодіодів, виготовлених за поширеною технологією накладання жовтого люмінофора на світлодіод з синім випромінюванням).

Якщо гіпотеза стосовно надзвичайної важливості присутності ближнього інфрачервоного випромінювання у повсякденному світловому середовищі людини підтвердиться, то введення у системи освітлення додаткових світлодіодів з випромінюванням у цьому спектральному діапазоні добре узгоджується з використанням інфрачервоної частини оптичного діапазону для передачі даних у системах Li-Fi.

Існує можливість використовувати приймачі Li-Fi на сонячних елементах, де сонячні елементи діють як приймачі даних, і в той же час збирають сонячне світло як енергію. Це підтримує загальну концепцію щодо підвищення енергоефективності світлодіодного освітлення за рахунок використання для його живлення фотоелектричних елементів (сонячних батарей).

При використанні технології Li-Fi, і передача даних, і забезпечення освітлення відбувається за допомогою одного і того ж самого пристрою. Тому на сьогодні прогнозується, що Li-Fi стане поштовхом для злиття галузей бездротового зв'язку та освітлення. Важливою передумовою подальшого впровадження технології Li-Fi є наявність стандартів. Саме у напрямку стандартизації технології Li-Fi розпочалася робота в IEEE 802.15.7, IEEE 802.11, ITU-R [38]. Зокрема, на сьогодні існує робоча група щодо світлових комунікацій у межах 802.11bb [41].

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що передумовами для розробки норм штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини, є поява нових даних стосовно впливу на організм людини світлового випромінювання біологічно-активного видимого діапазону та близького інфрачервоного діапазону, а також широке впровадження світлодіодних технологій. Останні потенційно є найбільш перспективними стосовно відтворення властивостей природного освітлення, синхронізації з ним та імітації виду з вікна. Ці передумови окреслюють наступні актуальні напрямки розвитку норм зі штучного освітлення: регулювання наявності в спектрі освітлювальних систем випромінювання біологічно-активного видимого діапазону та близького інфрачервоного діапазону, визначення інтенсивності і тривалості дії цього випромінювання

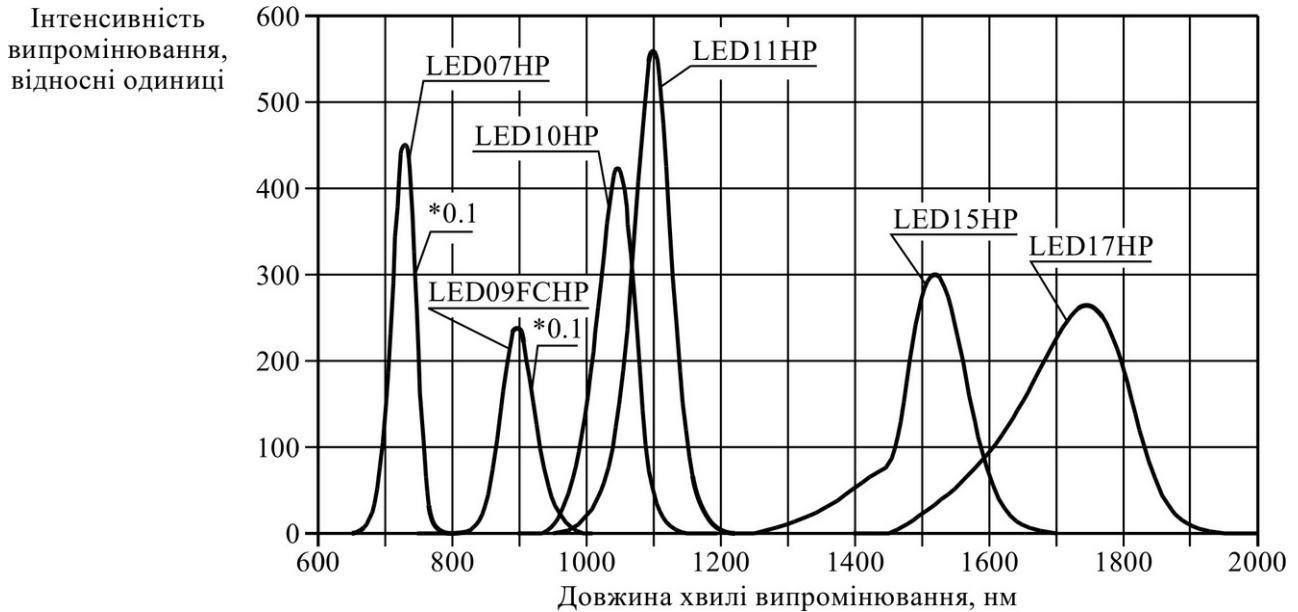


Рис. 5. Спектри випромінювання сучасних світлодіодів ближнього інфрачервоного діапазону [37]

залежно від різних добових періодів; розробка методики кореляції світлових і візуальних характеристик установок штучного освітлення та дійсного виду з вікна; синхронізація освітлювальних норм з нормами щодо застосування технології LiFi.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому доцільно дослідити питання відповідності систем штучного освітлення, узгодженого з біоритмами людини, вимогам щодо рівня енергоефективності сучасних будівель.

Література

1. Основы стандартизации, метрологии и сертификации: учебник для студентов вузов / А. В. Архипов и др.; под ред. В. М. Мишина. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 447 с.
2. Пул Ч. Нанотехнологии. 4-е издание, исправл. и дополн. / Ч. Пул, Ф. Оуэнс; пер. с англ. под. ред. Ю. И. Головина. – Москва: Техносфера, 2009. – 336 с.
3. Impact of Light on Human Beings. Licht.wissen 19. – Frankfurt am Main: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.v., 2014. – 56 p.
4. Horticultural Lighting - The Root to International Standards // LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology. – 2019. – Iss. 73. – P. 30-31.
5. Guide to Human Centric Lighting (HCL). Licht.wissen 21. – Frankfurt am Main: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.v., 2018. – 40 p.
6. Chien Szu-Cheng. Implications for Human-Centric Lighting Design in Tropical Nursing Homes: A Pilot Study / Szu-Cheng Chien // LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology. – 2019. – Issue 71. – P. 40-47.
7. Сергейчук О. В. Історія та перспективи розвитку норм з енергоефективності будівель в Україні / О. В. Сергейчук // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2017. – Вип. 9. – с. 211-221.
8. Сергейчук О. В. Основные задачи усовершенствования нормативной базы по освещению биосферосовместимого строительства / О. В. Сергейчук // Вопросы теории биосферной совместимости городов и поселений. Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». – 2015. – Вип. 3(11). – с. 7-17.
9. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. – Чинні від 01.03.2019. – Київ: Укрархбудінформ, 2018. – 137 с.
10. DIN SPEC 5031-100:2015. Optical radiation physics and illuminating engineering – Part 100: Melanopic effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra. – Publication Date: August 2015. – German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2015. – 33 p.
11. DIN SPEC 67600:2013 Biologically effective illumination – Design guidelines. – Publication Date: April 2013. – German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2013. – 68 p.
12. Nobel Prize 2017: the powerful effect of light on circadian rhythm / Latest news // Diatal (lighting innovator) [Electronic Resource]. – URL: <https://www.diatal.com/en/news-en/nobel-prize-2017-the-powerful-effect-of-light-on-circadian-rhythm-9262>.
13. Uddin MS. Circadian Rhythms: Biological Clock of Living Organisms / Uddin MS., Al. Mamun A. // Biol Med

(Aligarh). – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 129. – <http://doi.org/10.4172/0974-8369.1000e129>

14. Haumer Peter. Healthy Light - LED Technology for Health and Care Applications / Peter Haumer // LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology. – 2019. – Iss. 71. – p. 68-73.

15. CIE Calls for Focused Research Efforts to Support Healthful Lighting Recommendations [Електронний ресурс] // LED professional (The Global Information Hub for Lighting Technologies). – URL: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/cie-calls-for-focused-research-efforts-to-support-healthful-lighting-recommendations>.

16. Green Schools: Attributes for Health and Learning. – Washington: National Academy of Sciences USA, 2007. – 192 p.

17. Aurelien David. Circadian-Friendly Light Emitters: From CCT-Tuning to Blue-Free Technology / David Aurelien // LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology. – 2019. – Iss. 71. – p. 58-63.

18. Gringras P. Bigger, Brighter, Bluer-Better? Current light-emitting devices – adverse sleep properties and preventative strategies / P. Gringras, B. Middleton, DJ. Skene, VL. Revell // Frontiers in Public Health. – 2015. – Vol. 3. – article 233. – <http://www.doi.org/10.3389/fpubh.2015.00233>

19. Zimmerman S. Melatonin and the Optics of the Human Body / Scott Zimmerman, Russel J. Reiter // Melatonin Research. – 2019. – Vol. 2 (1). – p. 138-160. – <http://www.doi.org/10.32794/mr11250016>

20. BS EN 17037:2018. Daylight in buildings. – Publication Date: 07.05.2019. – British Standards Institution (BSI). – 2019. – 70 p.

21. Paule B. A lighting simulation tool for the new European daylighting standard / B. Paule, J. Boutillier, S. Pantet, Y. Sutter // International Building Simulation Association England: 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, September, 11-12, 2018. – Cambridge (UK). – 2018. – P. 032-037.

22. Дарула С. Обзор современного состояния и перспектив стандартизации в области естественного внутреннего освещения / С. Дарула // Светотехника. – 2019. – №. – с. 6-20.

23. Research and practice evidence. Chromaviso [Electronic Resource]. – URL: <https://chromaviso.com/en/circadian-lighting/research-in-circadian-lighting/>.

24. Helping students stay focused. Philips [Electronic Resource]. – URL: http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/education/wintelre_

25. Artificial Sky [Electronic Resource]. – URL: <http://www.artificialsky.com>.

26. CoeLux [Electronic Resource]. – URL: <https://www.coelux.com/en/home-page/index>.

27. Ewinlight [Electronic Resource]. – URL: <http://www.ewinlight.com/>

28. Sky Factory [Electronic Resource]. – URL: <https://www.skyfactory.com/>.

29. Indiegogo. Sunlight LED Window [Electronic Resource]. – URL: https://www.indiegogo.com/projects/sunlight-led-window-light#.

30. Sky Factory. Education [Electronic Resource]. – URL: <https://www.skyfactory.com/education/>

31. Erbach G. Understanding energy efficiency [Electronic Resource] / Gregor Erbach // European Parliamentary Research Service (EPRS): PE 568.361. Briefing, October 2015. – 10 p. – URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS_BRI\(2015\)568361_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS_BRI(2015)568361_EN.pdf)

32. Lumileds Enables Next Step in Human Centric Lighting with Launch of Luxeon Fusion [Electronic Resource] // LED professional (The Global Information Hub for Lighting Technologies). – URL: <https://www.led-professional.com/products/led-modules-led-light-engines/lumileds-enables-next-step-in-human-centric-lighting-with-launch-of-luxeon-fusion>.

33. Zastrow L. Free radical threshold value: A new universal body constant / Zastrow L, et al. // Skin Pharmacology and Physiology. – 2015. – Vol. 28 (5). – p. 264-268. – <http://www.doi.org/10.1159/000435893>

34. История мировой философии: учеб. пособие / А. И. Алешин, К. В. Бандуровский, В. Д. Губин и др.; под ред. В. Д. Губина, Т. Ю. Сидориной. – Москва: Астрель: АСТ: ХРАНИТЕЛЬ, 2007. – 494 с.

35. Антична література: підруч. для студ. педагогічних інститутів. – Київ: Вища школа, 1976. – 439 с.

36. Гловацька К. І. Міфи Давньої Греції: для серед. та ст. шк. віку / К. І. Гловацька. – Київ: Веселка, 1986. – 239 с.

37. Мощные светодиоды 0,7-1,74 мкм. Компания ООО «АИБИ» (IBSG Co., Ltd.) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ibsg.ru/led/led.html>.

38. Haas Harald. LiFi as a Paradigm-Shifting 5G Technology / Harald Haas // LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology. – 2019. – Issue 73. – p. 54-61.

39. Signify Launches Trulifi High-Speed Commercial LiFi System for Their Luminaires [Electronic Resource] // LED professional (The Global Information Hub for Lighting Technologies). – URL: https://www.led-professional.com/project_news/lamps-luminaires/signify-launches-trulifi-high-speed-commercial-lifi-system-for-their-luminaires.

40. PureLiFi [Electronic Resource]. – URL: <https://purelifi.com/company/>

41. IEEE Task Force Works on Global LiFi Standard for Light: The new guidelines for LiFi are to enhance IEEE 802.11 Wi-Fi standard / pureLiFi [Electronic Resource]. – URL: <https://purelifi.com/lifi-is-getting-a-global-standard/>

42. Єгорченков В. Аналіз заходів з підвищення енергоефективності у новій редакції норм з природного і штучного освітлення / В. Єгорченков, Л. Коваль, Д. Радомцев, О. Сергейчук // Інтегровані енергоефективні

технології в архітектурі та будівництві: тези доповідей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції «Енергоінтеграція-2019», 24-26 квітня 2019 р., Київ, Україна. – 2019. – С. 6-7.

References

1. Arhipov A. V. i dr. *Osnovy standartizatsii, metrologii i sertifikatsii*. YuNITI-DANA, 2007.
2. Pul Ch., Ouens F. *Nanotehnologii*. Tehnosfera, 2009.
3. *Impact of Light on Human Beings. Licht.wissen 19*. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.v., 2014.
4. “Horticultural Lighting - The Root to International Standards.” *LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology*. 2019. Iss. 73. P. 30-31.
5. Guide to Human Centric Lighting (HCL). *Licht.wissen 21*. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.v., 2018.
6. Chien Szu-Cheng. “Implications for Human-Centric Lighting Design in Tropical Nursing Homes: A Pilot Study.” *LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology*. 2019. Iss. 71. P. 40-47.
7. Sergeichuk O. V. “Istorlia ta perspektyvy rozvytku norm z energoefektivnosti budivel v Ukraini.” *Energoefektivnist v budivnitstvi ta arhitekturi*. 2017. Vyp. 9. P. 211-221.
8. Sergeichuk O. V. “Osnovnye zadachi usovershenstvovaniia normativnoi bazy po osveshcheniu biosferosovmestimogo stroitelstva.” *Voprosy teorii biosfernoi sovmestimosti gorodov i poselenii. Biosfernaia sovmestimost: chelovek, region, tehnologii*. 2015. Vyp. 3(11). FGBOU VO «Yugo-Zapadni gosudarstvennyi universitet». pp. 7-17.
9. *Pryrodne i shtuchne osvittlenia*. DBN V.2.5-28-2018, Ukrarkhbudininform, 2018.
10. *Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Melanopic effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra*. DIN SPEC 5031-100:2015, German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2015.
11. *Biologically effective illumination - Design guidelines*. DIN SPEC 67600:2013, German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2013.
12. Nobel Prize 2017: the powerful effect of light on circadian rhythm. *Dietal (lighting innovator)*. <https://www.dietal.com/en/news-en/nobel-prize-2017-the-powerful-effect-of-light-on-circadian-rhythm-9262>.
13. Uddin MS. “Circadian Rhythms: Biological Clock of Living Organisms.” *Biol Med (Aligarh)*. 2017. Vol. 10 (1). P. 129. <http://doi.org/10.4172/0974-8369.1000e129>
14. Haumer Peter. “Healthy Light - LED Technology for Health and Care Applications.” *LED professional Review*, Iss. 71, Luger Research e.U. Institute for Innovation & Technology, 2019, pp. 68-73.
15. CIE Calls for Focused Research Efforts to Support Healthful Lighting Recommendations. *LED professional (The Global Information Hub for Lighting Technologies)*, <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/cie-calls-for-focused-research-efforts-to-support-healthful-lighting-recommendations>. Posted by 25 September 2017.
16. *Green Schools: Attributes for Health and Learning*. National Academy of Sciences USA, 2007.
17. Aurelien David. “Circadian-Friendly Light Emitters: From CCT-Tuning to Blue-Free Technology.” *LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology*. 2019. Iss. 71. P. 58-63.
18. Gringras P., Middleton B., Skene DJ., Revell VL. “Bigger, Brighter, Bluer-Better? Current light-emitting devices – adverse sleep properties and preventative strategies.” *Frontiers in Public Health*. 2015. Vol. 3. article 233. <http://www.doi.org/10.3389/fpubh.2015.00233>
19. Scott Zimmerman, Russel J. Reiter. “Melatonin and the Optics of the Human Body.” *Melatonin Research*. 2019. Vol. 2 (1). P. 138-160. <http://www.doi.org/10.32794/mr11250016>
20. *Daylight in buildings*. BS EN 17037:2018, British Standards Institution (BSI), 2019.
21. Paule B., Boutillier J., Pantet S., Sutter Y. “A lighting simulation tool for the new European day lighting standard.” *International Building Simulation Association England: 4th Building Simulation and Optimization Conference, 11-12 September 2018, Cambridge (UK)*, 2018, pp. 032-037.
22. Darula S. “Obzor sovremennogo sostoyaniya i perspektiv standartizatsii v oblasti estestvennogo vnutrennego osvescheniya.” *Svetotekhnika*, 2019. no. 1. P. 6-20.
23. Research and practice evidence. *Chromaviso*. <https://chromaviso.com/en/circadian-lighting/research-in-circadian-lighting/>
24. Helping students stay focused. *Philips*. <http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/education/wintelre>.
25. *Artificial Sky*, <http://www.artificialsky.com>
26. *CoeLux*. <https://www.coelux.com/en/home-page/index>
27. *Ewinlight*. <http://www.ewinlight.com/>
28. *Sky Factory*. <https://www.skyfactory.com/>
29. Sunlight LED Window. *Indiegogo*. <https://www.indiegogo.com/projects/sunlight-led-window-light#/>
30. *Education Sky Factory*. <https://www.skyfactory.com/education/>
31. Erbach G. “Understanding energy efficiency.” *European Parliamentary Research Service (EPRS): PE 568.361. Briefing, October 2015*. <http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/>

[EPRS_BRI\(2015\)568361_EN.pdf](#)

32. "Lumileds Enables Next Step in Human Centric Lighting with Launch of Luxeon Fusion." *LED professional*, <https://www.led-professional.com/products/led-modules-led-light-engines/lumileds-enables-next-step-in-human-centric-lighting-with-launch-of-luxeon-fusion>. Posted by 15 May 2019.

33. Zastrow L. et al. "Free radical threshold value: A new universal body constant." *Skin Pharmacology and Physiology*. Vol. 28 (5), 2015. P. 264-268. <http://www.doi.org/10.1159/000435893>

34. Aleshin A. I., Bandurovskii K. V., Gubin V. D. i dr. *Istoriia mirovoi filosofii: ucheb. posobie*. Astrel: AST: HRANITELЬ, 2007.

35. *Antychna literatura: pidruch. dlia stud. pedahohichnykh instytutiv*. Vyshcha shkola, 1976.

36. Hlovatska K. I. *Mify Davnoi Hretsii*. Veselka, 1986.

37. Moshchnye svetodiody 0,7-1,74 mkm. *ООО «AIBI» (IBSG Co., Ltd.)*. <http://www.ibsg.ru/led/led.html>.

38. Haas Harald. "LiFi as a Paradigm-Shifting 5G Technology." *LED professional Review. Luger Research e.u. Institute for Innovation & Technology*. 2019. Iss. 73. P. 54-61.

39. Signify Launches Trulifi High-Speed Commercial LiFi System for Their Luminaires. *LED professional (The Global Information Hub for Lighting Technologies)*, https://www.led-professional.com/project_news/lamps-luminaires/signify-launches-trulifi-high-speed-commercial-lifi-system-for-their-luminaires.

40. Company pureLiFi. <https://purelifi.com/company/>

41. IEEE Task Force Works on Global LiFi Standard for Light: The new guidelines for LiFi are to enhance IEEE 802.11 Wi-Fi standard. PureLiFi. <https://purelifi.com/lifi-is-getting-a-global-standard/>

42. Yehorchenkov V., Koval L., Radomtsev D., Serheichuk O. "Analiz zakhodiv z pidvyshchennia enerhoefektyvnosti u novii redaktsii norm z pryrodnoho i shtuchnoho osvittlenia." *Intehrovani enerhoefektyvni tekhnologii v arkhitekturi ta budivnytstvi: tezy dopovidei deviatoi mizhnarodnoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii «Enerhoitehrat-siia-2019», 24-26 april 2019 p., Kyiv, Ukraine*. 2019. P. 6-7.

УДК 745/749:628.9

Предпосылки и перспективы нормирования искусственного освещения, согласованного с биоритмами человека

Л. М. Коваль¹

¹канд. искусствоведения, доц., докторант. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, likocolor@gmail.com, ORCID:0000-0002-7324-0377

Аннотация. В статье анализируются такие предпосылки нормирования искусственного освещения, согласованного с биоритмами человека, как появление новых данных о влиянии на организм человека светового излучения биологически активного видимого диапазона и ближнего инфракрасного диапазона, а также широкое внедрение LED-технологий, которые потенциально являются наиболее перспективными относительно воспроизведения свойств природного освещения, синхронизации с ним и имитации вида из окна. На основе анализа соответствующих предпосылок предложен перечень актуальных направлений развития нормирования искусственного освещения: регулирование наличия в спектре осветительных систем излучения биологически активного видимого диапазона и ближнего инфракрасного диапазона, определение интенсивности и продолжительности действия этого излучения в зависимости от различных суточных периодов; разработка методики корреляции световых и визуальных характеристик установок искусственного освещения и действительного вида из окна; синхронизация осветительных норм с нормами по применению технологии Li-Fi. Вопрос энергоэффективности систем искусственного освещения, согласованного с биоритмами человека требует более детального рассмотрения в отдельной публикации.

Ключевые слова: нормирование искусственного освещения, биоритмы человека, циркадная система, LED, Li-Fi

UDC 745/749:628.9

Prerequisites and Prospects for Establishing Regulations on Artificial Lighting Consistent with Human Biorhythms

L. Koval¹

¹PhD, associate professor, doctoral student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, likocolor@gmail.com, ORCID:0000-0002-7324-0377

Abstract. Today, the current DBN V.2.5-28: 2018, "Natural and artificial lighting" provides the use of LEDs as a source of light both for lighting the city spaces and for general lighting of premises. In general, the transition of society to digital light-emitting diode technology in lighting is a change in the paradigm that occurs at a rapid pace and relates not only to visual perception and energy efficiency, but also to the optimization of the biological and emotional impact of light. This trend highlights the need for more complete consideration of non-visual light effects in relevant regulations. Therefore, the next step in establishing these regulations should be a set of standards and guidelines for lighting design consistent with human biorhythms. In some countries such documents have already been adopted, which minimizes the risks to human health and safety caused by inappropriate use of new lighting technologies. The article analyzes the following prerequisites for the development of regulations on artificial lighting as the emergence of new data on the impact of light radiation of the biologically active visible range and the near-infrared range on a human body, as well as the widespread introduction of LED technologies that are potentially the most promising tools in reproducing the properties of natural light, synchronization with it and simulating the view from the window. Basing on the analysis of the relevant prerequisites, a list of the most important trends in the development of artificial lighting regulation is proposed: regulation of the presence of the biologically active visible range and the near-infrared range in the spectrum of light systems; determination of the intensity and duration of this radiation, depending on different diurnal periods; development of the technique of correlation of light and visual characteristics of artificial lighting installations and the actual view from the window; synchronization of illumination regulations with regulations concerning application of Li-Fi technology. The issue of energy efficiency of artificial lighting systems consistent with human biorhythms needs to be considered separately in the future publications.

Keywords: regulations on artificial lighting, human biorhythms, circadian system, LED, Li-Fi

Надійшла до редакції / Received 31.08.2019

УДК 674.047

Шляхи зниження тепловтрат у зарядіаторній ділянці огорожувальних конструкцій

П. М. Гламаздин¹, П. О. Пасічник²

¹доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, sib.kiev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2611-2687

²к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, pasichnik89@bigmir.net, ORCID: 0000-0001-8499-6949

Анотація. Зниження тепловтрат огорожувальних конструкцій в зарядіаторній ділянці – відомий захід підвищення енергоефективності, який не потребує значних капіталовкладень і має достатньо суттєвий ефект. Головним відомим шляхом є використання зарядіаторних екранів з теплоізоляційного матеріалу та відбивною поверхнею, що обернена до приміщення. Використання таких екранів зазвичай застосовується без відповідних розрахунків і за відсутності конкретних технічних характеристик. При розробці нових конструкцій опалювальних приладів необхідно враховувати особливості тепловіддачі приладу до стіни в зарядіаторній ділянці. При цьому слід передбачити заходи щодо зниження таких тепловтрат в конструкції приладу. На кафедрі теплотехніки розроблено нову конструкцію секції опалювального приладу та різні конструктивні способи зниження тепловтрат через зарядіаторну ділянку. Також у статті розглянуто особливості теплообміну опалювального приладу із стіною в зарядіаторній ділянці та проведено глибокий літературний огляд робіт, що присвячені даній тематиці. На основі огляду отримано висновок, що відомі роботи не дають цілісного розуміння процесів теплообміну в досліджуваній системі тіл. Також виявлено, що провідні виробники опалювальної техніки відпрацьовують шляхи зниження тепловтрат через зарядіаторні ділянки огорожувальних конструкцій, зокрема зниження температури, °С, стінки опалювального приладу, яка обернена до стіни. Результати статті показують можливість підвищити ефективність роботи опалювального приладу майже на 4 % та розкривають не дослідженні особливості теплообміну опалювальних приладів і зовнішньої стіни.

Ключові слова: опалювальний прилад, тепловтрати, складний теплообмін, зарядіаторний екран

Вступ. Водяні опалювальні прилади зазвичай розміщуються в приміщеннях на зовнішніх стінах найчастіше під вікном. Таке розміщення приладів оптимальне з точки зору формування температурного поля в приміщенні [1]. Однак, воно має суттєву ваду. Зовнішня стіна в місці розміщення приладу має більшу температуру, °С, ніж інші ділянки зовнішніх стін. Через це в навколишнє середовище втрачається більше теплоти

Актуальність дослідження. На опалення і вентиляцію будівель різного призначення втрачається близько 40 % усіх паливно-енергетичних ресурсів. Підвищення ефективності систем опалення, зокрема їхніх головних функціональних елементів, є важливою задачею науки і техніки.

Останні дослідження та публікації. Проблема тепловтрат зарядіаторної ділянки стіни привертала увагу дослідників уже давно. Так у [2] це явище досліджувалось експериментально. Виявлено, що додаткові тепловтрати можуть досягати 5-6 % залежно від розмірів опалювальних приладів. При цьому виявлено, що використання колончастих опалювальних приладів дає менші додаткові тепловтрати, ніж радіатори з гладкими зовні-

шніми поверхнями. У роботі [3] автори провели чисельний аналіз процесів теплообміну між зарядіаторною ділянкою зовнішнього огороження та оберненою до нього поверхнею опалювального приладу. Отримано висновок, що основним видом теплообміну між стінкою й опалювальним приладом є променевий теплообмін. Авторі запропонували для зменшення додаткових тепловтрат розміщувати між опалювальним приладом та зарядіаторною ділянкою огороження тепловідбивний екран – алюмінієву фольгу, – що має теоретичне підґрунтя [4]. Сучасний підхід полягає в розміщенні на внутрішній поверхні зарядіаторної ділянки зовнішнього огороження шару теплоізоляційного матеріалу з металізованою поверхнею для відбиття променевого потоку теплоти від опалювального приладу. Експериментальні дослідження показують можливість зменшення додаткових тепловтрат не менше, ніж на 10 % [5]. Висновки теоретичного розрахункового дослідження впливу такого тепловідбивного екрану [6] більш оптимістичні і декларують зменшення тепловтрат на 20 % [6]. Обидва запропоновані засоби зменшення тепловтрат: улаштування екрану з алюмінієвої фольги та встановлення додаткового шару з те-

плоізоляційного матеріалу, який металізований з боку опалювального приладу, мають свої вади. Екран з алюмінієвої фольги важко реалізувати в якійсь технічній конструкції. Саме тому він ніколи не був реалізований. Екран з теплоізоляційного матеріалу реалізується на практиці і тому заслуговує більш детального аналізу. Теплоізоляційний матеріал є додатковим термічним опором для передачі теплоти теплопровідністю, а металева плівка відбиває радіаційний тепловий потік назад на поверхню опалювального приладу. На рис. 1 представлені схеми процесу теплообміну між опалювальними приладом та зовнішньою стіною напроти нього у варіанті з захисним екраном та без останнього.

У чисельному дослідженні впливу теплозахисного екрану на процес теплообміну в обох варіантах [6] здійснено спробу побудувати фізичну і математичну моделі теплообміну та обчислити з їхньою допомогою кількісно вплив екрану. Загальний процес теплообміну розділяється на дві складові: конвективну та радіаційну. В основу розрахунку покладені деякі припущення, а саме

- швидкість повітря між зовнішньою стіною та поверхнею оберненої до неї сторони опалювального приладу прийнята 1 м/с;
- радіаційна характеристика плівки металу на поверхні теплозахисного екрану та теплофізичні властивості теплоізоляційного матеріалу лишаються незмінними протягом всього терміну експлуатації.

Останні припущення призводять до ідеалізації теплозахисного впливу. Необхідно врахувати, що в процесі експлуатації відбивна плівка алюмінію на поверхні екрану швидко вкриється пилом. Її ступінь чорноти буде більшою за значення $\varepsilon_{en}=0,055$, яке прийнято в [6]. А це призведе до підвищеного поглинання теплоти забрудненим екраном і, відповідно, зростання тепловтрат радіаторної ділянки стіни.

Для обчислення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією в прошарку між опалювальним приладом та теплоізоляційним екраном на огороженні залежно від швидкості повітря w , м/с, автори застосовували формулу

$$\alpha_k = 11,63 w^{1/2}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}) \quad (1)$$

з посиланням на довідник [7]. Однак, у розділі роботи [7], присвяченому природній конвекції, така формула відсутня.

Прийнята швидкість повітря 1 м/с більше характерна для вимушеної конвекції. Тому отримані в результаті значення коефіцієнта тепловіддачі з великою ймовірністю завищені. Вони наближаються до результатів чисельного дослідження теплообміну між двома панелями плоского штампованого сталевго радіатора [8].

Водночас у роботі [3] стверджується, що конвективним теплообміном у прошарку можна знехтувати, а розрахунки за рекомендаціями в роботі [9] дають значно менший результат. Таким чином, отримане в результаті розрахунків авторів [6] значення зниження додаткових тепловтрат на рівні 20 % суттєво завищено.

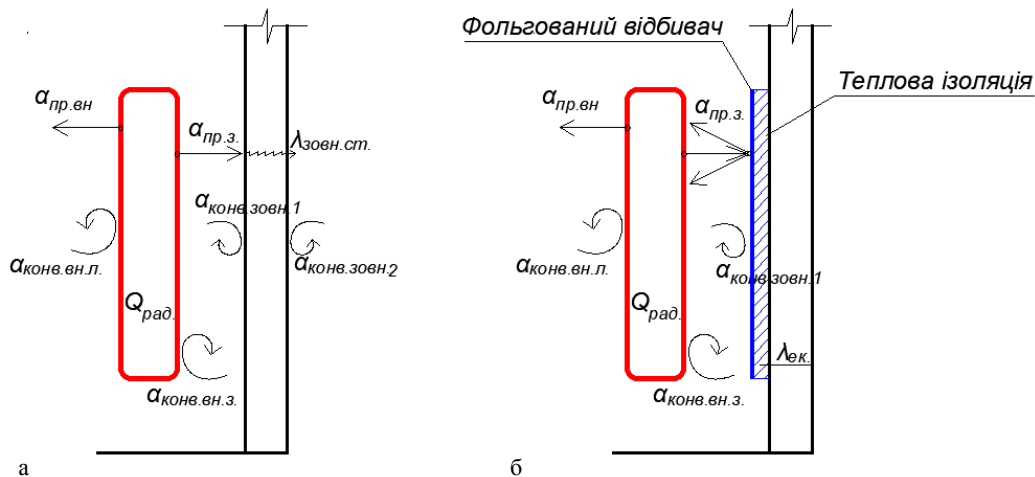


Рис.1 Схема теплопередачі опалювального приладу та стіни:
а – без відбивного екрану; б – з екраном:

$\alpha_{пр.вн.}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням до приміщення, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; $\alpha_{пр.з.}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням до стіни за радіатором, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; $\alpha_{конв.вн.л.}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від лицьової сторони приладу, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; $\alpha_{конв.вн.з.}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від задньої сторони, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; $\alpha_{конв.зовн.1.}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією до стіни, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; $\alpha_{конв.зовн.2.}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією до навколишнього середовища, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; $\lambda_{зовн.ст.}$ – коефіцієнт теплопровідності зовнішньої стіни, $\text{Вт}/(\text{м К})$; $\lambda_{ек.}$ – коефіцієнт теплопровідності екрану, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$

При всій привабливій простоті розглянутого технічного рішення у нього виявлено вади:

- ✗ теплоізоляційний матеріал екрану в процесі експлуатації може виділяти шкідливі речовини, наприклад, феноли;
- ✗ екран за радіатором виглядає не достатньо естетично;
- ✗ у процесі експлуатації металева плівка вкривається пилом, який достатньо важко зняти, що приводить до втрати її відбивної здатності;
- ✗ матеріал, з якого виготовлено екран, може втрачати свої теплоізоляційні властивості, що може звести нанівець всі позитивні якості екрану.

Формулювання цілей статті. Дослідження шляхів зниження тепловтрат у зарядіаторній ділянці огорожувальних конструкцій за рахунок модернізації опалювальних приладів.

Основна частина. Важливим висновком розглянутих робіт, якого не дійшли автори, є необхідність зниження температури, °С, стінки опалювального приладу, що обернена до стіни. Адже променевий тепловий потік згідно з законом Стефана-Больцмана [4] залежить від різниці температури, °С, між гарячою та холодною стінкою в четвертому степені. З урахуванням цієї обставини деякі виробники опалювальних приладів почали випускати радіатори, у яких температура поверхонь, °С, що обернені в приміщення і до огороження, мають різне значення.

Зміни в конструкції опалювальних приладів, що реалізують названий принцип, різні для різних типів приладів. Для сталевих штампованих приладів реалізовано напрямок руху води, за якого вона спочатку проходить вздовж стінки приладу, що обернена всередину приміщення. Лише після віддачі частини теплоти і зниження температури, °С, вода проходить вздовж стінки приладу, поверненої до зовнішнього огороження [10, 11] (рис. 2).

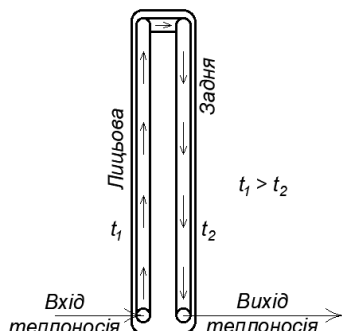


Рис. 2. Варіант руху теплоносія для оптимізації тепловіддачі опалювального приладу

Зменшення температури, °С, поверхні приладу, оберненої до зовнішньої стіни, приведе до зменшення інтенсивності як радіаційного, так і конвективного теплообміну в системі "радіатор-зовнішня стіна". Однак, такий прилад має вади:

- ✗ складніший у виробництві і, відповідно, дорожчий;
- ✗ вищий гідравлічний опір;
- ✗ більш вимогливим до складу води;
- ✗ зменшена кількість можливих варіантів під'єднання до системи;
- ✗ розглянутий принцип можливо реалізувати тільки для сталевих штампованих радіаторів.

Для секційних чавунних приладів з вертикальними ребрами існує інше технічне рішення. Сторона колонки, що обернена до внутрішнього середовища приміщення, не ребрується [12] (рис. 3). Для чавунних приладів оптимальна ширина ребра невелика [13], а температура, °С, на його поверхні менша, ніж температура, °С, на стінці колонки. Через це частка теплоти, що віддається ребром, істотно менша порівняно з загальною кількістю відданої основною колонкою опалювального приладу теплоти. Оскільки температура, °С, ребра менша за температуру, °С, поверхні колонки, прилад розташовується так, щоб ребра були обернені до зовнішнього огороження. Додаткова перевага такої конструкції в тому, що вага приладу без одного ребра істотно зменшується.

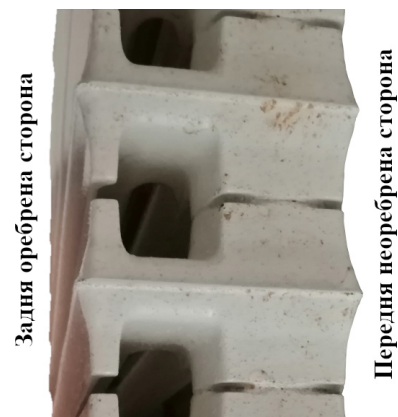


Рис. 3. Варіант оребрення чавунних приладів для оптимізації тепловіддачі

Для алюмінієвих секційних приладів ситуація істотно відрізняється. Завдяки високій теплопровідності алюмінію, ребра таких приладів мають високу ефективність при довжині, майже втричі більшій за довжину ребра чавунних приладів [13]. З цієї причини вони мають високий ступінь оребрення. Відмова від части-

ни ребер, розташованих з боку зовнішнього огородження, знизить ефективність цих приладів.

На кафедрі теплотехніки розроблений алюмінієвий секційний прилад з підвищеним коефіцієнтом оребрення. Він дає змогу використати принцип створення різної температури, °С, на поверхнях приладу, що обернені до приміщення й до огородження (рис. 4).

Наявність екрану 4 зменшує тепловий потік від каналу з теплоносієм та ребер 2 до зовнішньої стіни. Конструкція екрану передбачає нанесений з боку зовнішнього огородження шар теплової ізоляції, що зменшує тепловий потік до стіни. Водночас в середині каналу конвективна складова теплопередачі до повітря залишається незмінною.

Авторами статті було проведено експериментальне дослідження тепловіддачі задньої стінки 4 у випадках, коли вона виконана як (рис. 5):

- тепловідбивний екран (шліфувана оцинкована сталь з наклеєним ззовні пінофолом завтовшки 5 мм)
- звичайне алюмінієве ребро.

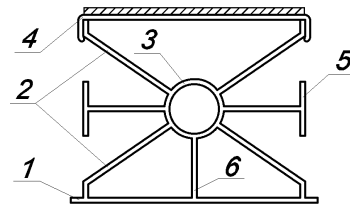


Рис. 4 Запропонована конструкція секції алюмінієвого опалювального приладу:

- 1 – основне ребро, обернене до приміщення;
- 2 – з'єднувальні ребра між основними ребрами та каналом з теплоносієм;
- 3 – канал з теплоносієм;
- 4 – екран для відбиття теплоти і формування конвективного потоку;
- 5 – додаткове ребро;
- 6 – центральне з'єднувальне ребро

Для проведення досліджень виготовлено спеціальні експериментальні секції опалювальних приладів заввишки 500 мм. Нагрівання в них замість гарячої води здійснюється за допомогою електроенергії. Для цього в канал для теплоносія вмонтовується трубчастий електронагрівач (ТЕН). Це дає змогу моделювати теплогідравлічні характеристики теплообміну в каналах поміж ребрами і на зовнішніх ребрах при різних режимах роботи дослідної секції опалювального приладу.

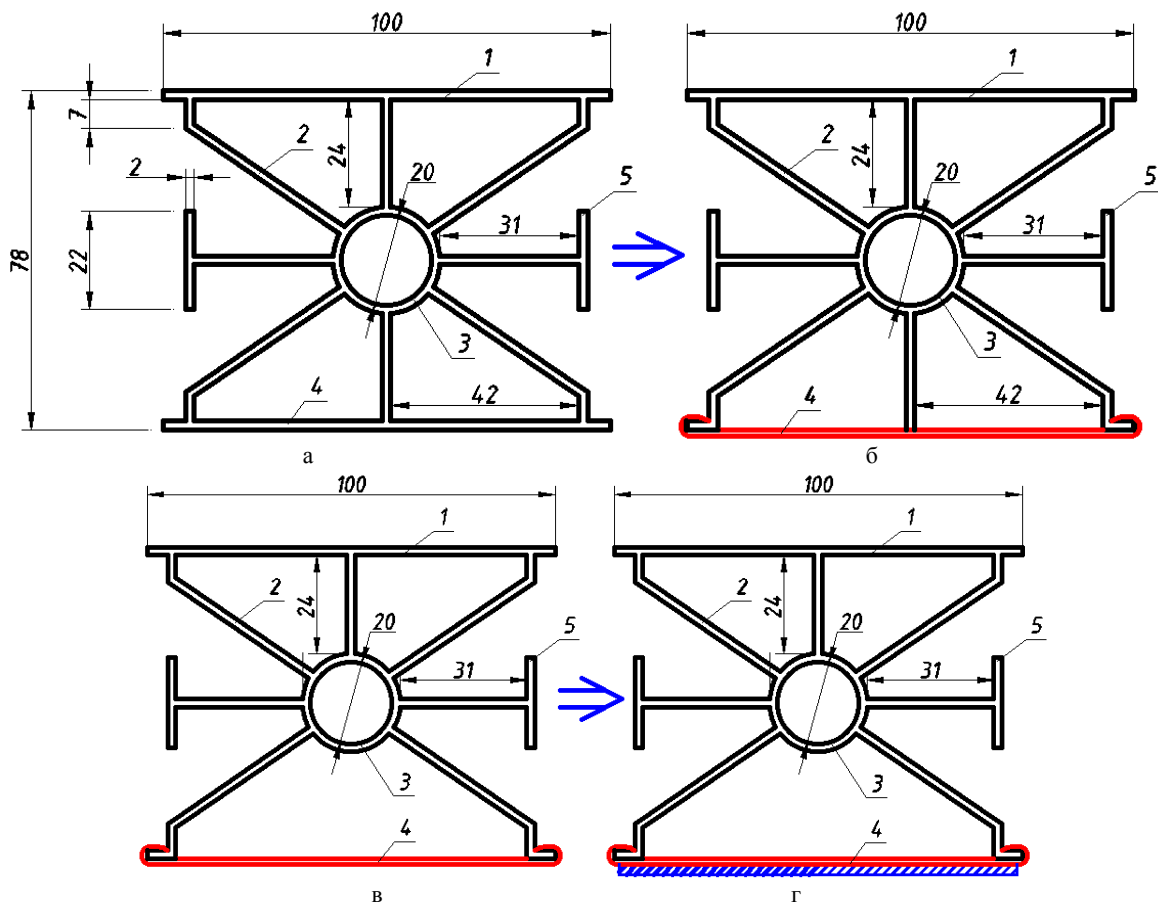


Рис. 5. Дослідні секції приладу:

- а – звичайна; б – заднє ребро виконане з полірованого оцинкованого листа; в – те ж саме що (б) без центрального ребра; г – те ж саме що (в) з тепловою ізоляцією.

До трубчастих електронагрівачів приєднується автотрансформатор регульований РНО. Потужність, яку ТЕН виділяв у експериментах, вимірювалася за допомогою амперметра та вольтметра, приєднаних відповідним чином до вимірювальної схеми. Амперметр використовувався типу Э-59 (0/2,5/5А), класом точності 0,5; з дзеркальною шкалою. Вольтметр використовувався типу АСТВ (0/150/300В) також з дзеркальною шкалою і класом точності 0,5. В експериментах вимірювалася температура, °С, поверхні основного ребра та екрана з теплоізоляцією, а також ребра, виготовленого з полірованого металу без теплоізоляції.

Температура, °С, вимірювалася у дев'яти точках за висотою ребра або екрана. Типові результати вимірювань представлені у вигляді графіка на рис. 6.

На графіку видно, що в нижній частині приладу температура, °С, основного ребра майже вдвічі більша, ніж для екрана з теплоізолюваної оцинкованої сталі. У верхній частині приладу температура, °С, більша майже в два з половиною рази. Самі криві на графіку відрізняються за характером. Для теплоізолюваної сталевий пластини різниця температури, °С, за висотою мінімальна. При цьому температура, °С, зростає майже за лінійною залежністю.

Для алюмінієвого основного ребра характер зростання температури, °С, носить неоднозначний характер. Це вказує на вплив

конвективного теплообміну в класичному вигляді. Спостерігається перехід від ламінарної течії повітря вздовж основного ребра з підвищенням температури, °С, ребра до розвиненої турбулентної течії у верхній його частині. На основі отриманих експериментальних даних проведено оцінку зменшення променевого теплового потоку на радіаторну ділянку зовнішнього огороження. Це дає змогу оцінити і зменшення тепловтрат через неї. Для розрахункової оцінки можливого зменшення тепловтрат було прийнято наступні умови. Опалювальний прилад складався з п'яти секцій по 70 Вт кожна, що сумарно видає 350 Вт. Температура внутрішньої стіни під час проведення експериментів становила 27 °С. Температура, °С, поверхні опалювального приладу приймалася з експериментальних даних. Температура, °С, випромінювальної поверхні усереднювалася за висотою.

Усереднена за висотою температура, °С, оберненої до зовнішньої стіни поверхні ребра опалювального приладу наведена в табл. 1. Теплообмін між стінками визначався за залежністю [7, 15]:

$$Q = \varepsilon_n \cdot c_0 \cdot F_1 \cdot \left(\left(\frac{t_1 + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273,15}{100} \right)^4 \right), \quad (2)$$

де t_1 і t_2 – температура поверхонь, відповідно, опалювального приладу та стіни, °С; ε_n – приведений ступінь чорноти системи тіл, що визначається з номограми [7]; F_1 – площа поверхні опалювального приладу, м².

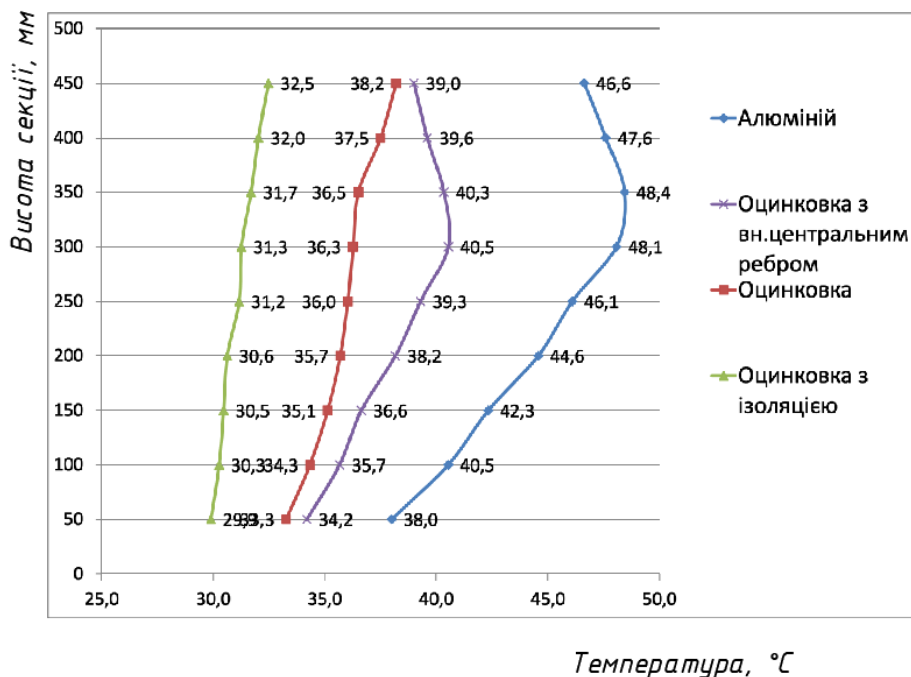


Рис. 6. Розподілення температури, °С, по задньому ребрі для дослідних секцій при потужності секції 70 Вт.

Таблиця 1

Характеристика поверхні ребра,
оберненого до огородження

Параметр	Конструкція на рис. 5			
	а	б	в	г
Середня температура стінки, °С	45	39,3	36	31,2
Приведений ступінь чорноти	0,84	0,28	0,28	0,78
Променевий тепловий потік, Вт	24	10,76	9,24	10,42

Для стіни приймасмо $\epsilon = 0,91$ (паперові шпалери), для пофарбованого алюмінію $\epsilon = 0,92$, для пінофолу $\epsilon = 0,859$ [16].

У результаті отримано, що використання теплового екрану заощаджує 13,58 Вт або 3,9 % теплової енергії на тепловтрати зарадіаторної ділянки стіни. Очевидно, що зі зростанням теплової потужності секцій ефективність за-

стосованого заднього ребра буде зростати.

Висновки. Опалювальний прилад з тепловим екраном потужністю 350 Вт втрачає на 13,58 Вт менше теплоти на нагрів зовнішньої стіни, тобто на 3,9 % більш ефективно використовує теплову енергію. При збільшенні теплової потужності секцій ефективність екрана буде зростати

Перспективи подальших досліджень. Проведені початкові експериментальні дослідження розробленого опалювального приладу показали його ефективність тепловіддачі та можливість зменшити тепловтрати через зарадіаторну ділянку зовнішнього огородження. Авторами розроблена програма подальших досліджень теплотехнічних характеристик розробленого опалювального приладу, яка наразі реалізується. Її результати будуть опубліковані в наступних статтях.

Література

1. Белоусов В. В. Основы проектирования систем центрального отопления / В. В. Белоусов, Ф. С. Михайлов. – Москва: Государственное издательство литературы по строительству и строительным материалам, 1962.
2. Burney G. Maroq H. Influence de l'isolation de la paroi au d'un radiateur sur les deperditions du local et sur l'emission du radiateur. – Centre Scientifique et technique de la construction in formation, Bruxelles. – 1967.
3. Бершидский Г. А. Обобщенное уравнение для расчета конвективного теплообмена параллельных пластин в условиях естественной конвекции / Г. А. Бершидский, А. Э. Нейбургер, А. Е. Лациник, М. Я. Поз // Отопительные котлы и нагревательные приборы. – 1970. – №32. – с. 127-135.
4. Спэрроу Э. М. Теплообмен излучением / Э. М. Спэрроу, Р. Д. Сесс. – Ленинград: Энергия, 1971.
5. Лазоренко В. О. Експериментальне дослідження теплофізичних характеристик теплозахисних екранів радіаторів системи водяного опалення / В. О. Лазоренко // Енергетика і автоматика. – 2013. – №4. – с. 46-53.
6. Колієнко А. Г. Розрахунок втрат теплоти ділянкою зовнішньої стіни за радіатором / А. Г. Колієнко, О. В. Шеліманова // Енергетика і автоматика. – 2014 – №194(2). – 180-184с
7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва: Атомиздат, 1979. – 416 с.
8. Басок Б. І. Моделювання тепловіддачі від двохпанельного радіатора / Б. І. Басок, Б. В. Давиденко, С. М. Гончарук, В. Г. Новіков // Будівельні конструкції. – 2013. – Вип. 77. – С. 60-64.
9. Отопление и вентиляция / Богословский В.Н. и др. – Москва: Стройиздат, 1991г.
10. Kermi [Електронний ресурс]. – URL: <https://kermi.com.ua>. – Дата доступу 07.10.2019
11. Buderus [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.buderus.ua>. – Дата доступу 07.10.2019
12. Viadrus [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.viadrus.com.ua>. – Дата доступу 07.10.2019
13. Швець Л. П. Результати випробувань дослідного алюмінієвого радіатора / Л. П. Швець, П. М. Гламаздін // Тези доповіді 65 науково-практичної конференції КНУБА, частина друга, Київ, 2004. – с. 76-77.
14. Каст В. Конвективный тепло- и массоперенос / В. Каст. – Москва: Энергия, 1980. – с. 49.
15. Шкловер А. М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А. М. Шкловер, Б. Ф. Васильев, Ф. В. Ушков. – Москва: Стройиздат, 1956. – 350 с.
16. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. Москва: Энергоатомиздат. – 1991. – 432 с.

References

1. Belousov V. V., Mihailov F. S. *Osnovy proektirovaniia sistem tsentralnogo otopeniia*. Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i stroitel'nym materialam, 1962.
2. Burney G. Maroq H. *Influence de l'isolation de la paroi au d'un radiateur sur les deperditions du local et sur l'emission du radiateur*. Centre Scientifique et technique de la construction in formation, Bruxelles.1967.
3. Bershidskii G. A., Nejburger A. E., Lacinik A. E., Poz M. Ya. "Obobshchennoe uravnenie dlia rascheta konvektivnogo teploobmena parallelnykh plastin v usloviakh estestvennoi konveksii." *Otopitelnye kotly i nagrevatelnye pri-bory*. 1970. №32. P. 127-135.
4. Sperrrow E. M., Sess R. D. *Teploobmen izlucheniem*. Energiya, 1971.

5. Lazorenko V. O. "Eksperimentalne doslidzhennya teplofizichnih harakteristik teplozahisnih ekraniv radiato-riv sistemi vodyanogo opalennya." *Energetika i avtomatika*. 2013. №4. P. 46-53.
6. Kolienko A. G., Shelimanova O. V. "Rozrahunok vtrat teploty diliankoiu zovnishnoi stiny za radiatorom." *Energetika i avtomatika*. 2014. №194(2). P. 180-184.
7. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena*. Atomizdat, 1979. 416 p.
8. Basok B. I., Davidenko B. V., Goncharuk S. M., Novikov V. G. "Modeliuvannia teploviddachi vid dvokhpanelnoho radiatora." *Budivelni konstruksii*. 2013. Vyp. 77. P. 60-64.
9. Bogoslovskii V. N. i dr. *Otoplenie i ventiliatsiia*. Strojizdat, 1991.
10. Kermi. <https://kermi.com.ua>
11. Buderus. <https://www.buderus.ua>
12. Viadrus. <http://www.viadrus.com.ua>
13. Shvets L. P., Glamazdin P. M. "Rezultaty vyprobuvan doslidnoho aliuminievoho radiatora." *Tezy dopovidi 65 naukovo-praktichnoi konferentsii KNUBA, chastina druha*, 2004. P. 76-77.
14. Kast V. *Konvektivnyi teplo- i massopereenos*. Energiya, 1980. 49 p.
15. Shklover A. M., Vasilev B. F., Ushkov F. V. *Osnovy stroitelnoi teplotekhniki zhilyh i obshchestvennykh zdani*. Stroiizdat, 1956. 350 p.
16. Blokh A. G., Zhuravlev Yu. A., Ryzhkov L. N. *Osnovy teploobmena izlucheniem. Spravochnik*. Energoatomizdat, 1991. 432 p.

УДК 674.047

Пути уменьшения теплопотерь в радиаторном участке ограждающих конструкций

П. М. Гламаздин¹, П. О. Пасечник²

¹ доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, sib.kiev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2611-2687

² к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, pasichnik89@bigmir.net,
ORCID: 0000-0001-8499-6949

Аннотация. Снижение теплопотерь ограждающих конструкций в радиаторном участке – известное мероприятие повышения энергоэффективности, не требующее значительных капиталовложений и дающее достаточно существенный эффект. Главным известным путём является использование радиаторных экранов из теплоизоляционного материала и отражающей поверхностью, которая обращена в помещение. Использование таких экранов обычно осуществляется без соответствующих расчётов и при отсутствии конкретных технических характеристик. При разработке новых конструкций отопительных приборов необходимо учитывать особенности теплоотдачи прибора к стене в радиаторном участке. При этом следует предусмотреть меры по снижению таких теплопотерь в конструктив прибора. На кафедре теплотехники разработана новая конструкция секции отопительного прибора и различные конструктивные способы снижения теплопотерь через радиаторный участок. Также в статье рассмотрены особенности теплообмена отопительного прибора со стеной в радиаторном участке и проведён глубокий литературный обзор работ, посвящённых данной тематике. На основе обзора можно сделать заключение, что известные работы не дают целостного понимания процессов теплообмена в исследуемой системе тел. Также выявлено, что ведущие производители отопительной техники обрабатывают пути снижения теплопотерь через радиаторные участки ограждающих конструкций, в частности снижение температуры, °С, стенки отопительного прибора, обращённой к стене. Результаты статьи показывают возможность повысить эффективность работы отопительного прибора почти на 4 % и раскрывают неисследованные особенности теплообмена отопительных приборов и внешней стены.

Ключевые слова: отопительный прибор, теплопотери, сложный теплообмен, радиаторный экран

UDC 674.047

Ways to Reduce Heat Loss in the Radiator Section of the Building Envelope

P. Glamazdin¹, P. Pasichnyk²,

¹ associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, sib.kiev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2611-2687

² PhD., associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, pasichnik89@bigmir.net,
ORCID: 0000-0001-8499-6949

Abstract. Reducing heat losses of building envelopes in the radiator section is a well-known energy efficient measure that does not require significant investment and has a fairly significant effect. The main known way is the use of radiator screens of heat-insulating material and a reflective surface that faces to the room. The use of such screens is usually carried out without appropriate calculations and in the absence of specific technical characteristics. When developing new designs of heating devices, it is necessary to take into account the specific features of the heat transfer of the device to the wall in the radiator area and include measures to reduce such heat losses in the device design. The article discusses the new design of the heating device section developed at the Department of Thermal Engineering and various constructive methods for reducing heat loss through the radiator section. The proposed radiator contains heat insulation on the bottom rib of the radiator. Also, the article discusses the features of heat exchange of a radiator with a wall in a radiator area and an in-depth literature review of the works devoted to this topic is carried out. Based on the review, we can conclude that the known works do not give a holistic understanding of heat transfer processes in the studied system of bodies. It was also revealed that the leading manufacturers of heating equipment are working out ways to reduce heat loss through the radiator sections of the building envelope. In particular, this is the decrease in the temperature, °C, of the wall of the radiator that faces the wall. The results of the article show the possibility of increasing the efficiency of the heating device by almost 4 % and reveal unexplored features of the heat exchange of heating devices and the external wall.

Keywords: radiator, heat loss, complex heat transfer, radiator area.

Надійшла до редакції / Received 08.10.2019

УДК 697.3.4

Дослідження опалювальних приладів на основі фазового переходу першого роду

Ю. О. Поденежко¹, М. А. Кириченко², Н. В. Чепурна³, В. В. Чепурний⁴

¹студ. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, format21@bigmir.net

²к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, kirichenko-m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3651-3153

³к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, chepurnayanv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8044-7563

⁴ст. викл. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, chepurnoyvv@ukr.net

Анотація. Нові розробки, орієнтовані на економію витрат для обігріву будинку, все більше привертають до себе увагу. Розробка високоефективних радіаторів опалення, що задовольняють вимогам сучасних інженерних систем, а саме: економічності, ефективності, швидкому рівномірному нагріву всієї поверхні, зручності монтажу та експлуатації, невисоким затратам на виготовлення та довговічності – є основним напрямком у проектуванні опалювальних приладів. Останні роки в системах опалення міст України набувають поширення опалювальні прилади на основі фазового переходу першого роду. У літературі та Інтернет-ресурсах зустрічається інша назва опалювальних приладів на основі фазового переходу першого роду – вакуумні радіатори. З внутрішньої порожнини секційної конструкції повністю викачане повітря. Зроблено це для того, щоб знизити тиск і, відповідно, зменшити температуру випаровування вторинного теплоносія. Робота вакуумного радіатора побудована за принципом функціонування герметичного двофазного термосифона. Їх можна використовувати як для централізованих систем опалення, так і для автономних. З приводу доцільності використання вакуумних радіаторів існують суперечливі думки, тому їхнє підтвердження або спростування потребує ґрунтовних досліджень. У даній роботі представлені результати експериментальних досліджень опалювального приладу на основі фазового переходу першого рівня. Вторинним теплоносієм є рідина з низькою температурою кипіння. Досліджено роботу опалювального приладу, визначено теплову потужність при різній температурі теплоносія. Проведено порівняння з традиційними сталевими та алюмінієвими опалювальними приладами. Особливу увагу приділено дослідженням вакуумних радіаторів з точки зору теплообміну. Виявлено основні переваги та недоліки даного опалювального приладу. Визначені шляхи подальшого дослідження даних типів опалювальних приладів.

Ключові слова: опалення, опалювальний пристрій, вакуумний радіатор, теплова потужність, вторинний теплоносій.

Вступ. Економія витрат на обігрів будинку все більше привертає до себе увагу і є одним із найголовніших пріоритетів у енергетичній безпеці України.

Розробка високоефективних радіаторів опалення, що задовольняють вимогам сучасних інженерних систем, є одним із основних напрямків проектування опалювальних приладів. На даний час існує широкий спектр класичних нагрівальних пристроїв, що здатні забезпечити комфорт у різноманітних приміщеннях.

До класичних опалювальних приладів відносяться сталеві панельні радіатори, алюмінієві радіатори, біметалеві радіатори тощо. На ринку представлений широкий модельний ряд відомих виробників як вітчизняного виробництва, так і іноземного.

Перспективним напрямком проектування опалювальних приладів є розробка високоефективних радіаторів опалення, що будуть задовольняти вимогами сучасних інженерних систем, а саме:

- економічності;
- ефективності;

- швидкому (мала інерційність) і рівномірному нагріву всієї поверхні;
- зручності монтажу та експлуатації;
- невисоким затратам на виготовлення;
- довговічності.

Останні роки в системах опалення міст України набувають поширення опалювальні прилади на основі фазового переходу першого роду (вакуумні радіатори). Стосовно доцільності використання вакуумних радіаторів існують суперечливі думки.

Отже, постало питання ґрунтовних досліджень та перспективних розробок опалювального приладу на основі фазового переходу першого роду.

Актуальність дослідження. В умовах постійного зростання цін на енергоносії постає питання щодо розробки й удосконалення ефективності опалювальних приладів з метою скорочення витрат теплоенергоресурсів, підвищення економічності, ефективності, швидкого рівномірного нагріву всієї поверхні, зручності монтажу та експлуатації, зниження затрат на виготовлення та підвищення довговічності опалювальних пристроїв.

Останні дослідження та публікації. У наш час у централізованих і автономних системах опалення широко використовуються традиційні сталеві та алюмінієві опалювальні прилади. Результати досліджень та використання даних опалювальних приладів широко висвітлене в довідкових джерелах [1,2,8,13,14,15].

Лінійка вакуумних приладів [16] має виробити, створені для електричного опалення, вакуумні реєстри та панельні радіатори.

У моделях [6,12,16] вакуумних радіаторів горизонтально розташованим каналом проходить теплоносій (вода) від центральних, або автономних систем опалення. Вона нагріває вторинний теплоносій. Останній передає теплоту до повітря приміщення крізь зовнішні стінки опалювального приладу.

У моделях вакуумного електричного радіатора [16] замість горизонтально розташованого каналу з теплоносієм встановлено ТЕН патронного типу. Цей нагрівач передає теплоту заповнювачу – маслу або воді, – що є вторинним теплоносієм.

Формулювання цілей статті. Провести дослідження опалювальних приладів, що працюють на основі фазового переходу першого роду. Визначити основні параметри таких опалювальних приладів та порівняти їх з традиційними. Встановити переваги та недоліки опалювальних приладів нового зразка. На підставі проведених досліджень запропонувати лінійку опалювальних приладів на основі фазового переходу першого роду (вакуумні радіатори).

Дослідна установка. Експериментальні дослідження проводилися на кафедрі теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та у випробувальному центрі ДП Сертифікаційний випробувальний центр опалювального обладнання, кафедрі теплотехніки Київського національного університету будівництва і архітектури. Випробувальні стенди вакуумного радіатора наведені на рис. 1.

Радіатор опалення, що працює на принципі фазового переходу першого рівня (випаровування-конденсація), є металевою конструкцією, що складається з основних елементів, наведених на рис. 2. Сталевою трубою 1 подається нагрітий теплоносій від генератора теплоти (первинний теплоносій). Вторинний теплоносій знаходиться в нижній частині герметичної конструкції 2 у вигляді вертикальних секцій трубчастого або пластинчастого типу. Він має низьку температуру кипіння.



Рис. 1. Випробувальні стенди вакуумного радіатора: а) пластинчастого типу; б) трубчастого типу.

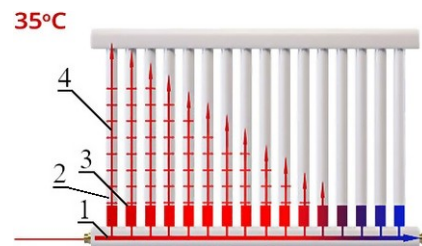


Рис. 2. Конструкція опалювального пристрою: 1 – сталевая труба для первинного теплоносія; 2 – герметична тепловіддавальна конструкція; 3 – вторинний теплоносій у рідкій фазі; 4 – пара вторинного теплоносія

У даних дослідах використовується дихлорметан (метилхлорид, фреон – 30, CH_2Cl_2). Його температура кипіння за нормальних умов становить $38,1\text{ }^\circ\text{C}$.

Принцип роботи опалювального приладу. Первинний теплоносій з заданою в системі опалення температурою надходить до опалювального приладу від генератора теплоти. При проходженні первинного теплоносія крізь опалювальний пристрій відбувається передача теплоти від первинного теплоносія вторинному. При цьому не відбувається їхнє перемішування. Вторинний теплоносій знаходиться у вакуумі, що знижує температуру його кипіння до $35\text{ }^\circ\text{C}$. При кипінні вторинний теплоносій випаровується та підіймається у формі пари внутрішньою частиною герметичної конструкції. На внутрішні стінки конструкції відбувається конденсація пари вторинного теплоносія. Конденсат сті-

кає до нижньої частини опалювального пристрою, де процес повторюється знову.

Результати досліджень. Дослідження проводилися на двох моделях з трубчастими та пластинчастими вертикальними секціями.

Поверхня опалювального пристрою нагрівається одночасно та рівномірно. Рівномірне нагрівання поверхні відбувається навіть при низькій температурі первинного теплоносія, оскільки випаровування вторинного теплоносія починає відбуватися за температури 35 °С. При цьому швидкість нагрівання поверхні досліджуваного опалювального пристрою значно перевищує швидкість нагрівання поверхні класичних радіаторів опалення. Променева складова передачі теплоти є основною при роботі опалювального приладу на основі фазового переходу першого роду. Під час експериментальних досліджень проводилася тепловізійна зйомка поверхонь опалювальних приладів (рис.3).

Крім цього, були проведені експериментальні дослідження для визначення та порівняння теплових потоків різних типів опалювальних приладів (табл.1).

Для визначення фактичного теплового потоку який передається повітрю, використовувалася теплова камера з внутрішньою циркуляцією повітря і теплоізоляцією огорожувальних конструкцій. Проводилися заміри температури на поверхні огорожувальних конструкцій і температури повітря в камері. Для радіатора рис. 1. а), заввишки 575 мм, завдовжки 975 мм, з оребренням 495x40x20 (НхШхВ), кількості колонок 16 шт., були отримані наступні дані (табл. 2, рис. 4). За стандартною формулою розрахунку опалювальних приладів теплова потужність залежно від температурного напору $\Delta t_m, K$

$$Q \sim \Delta t_m^{1+n}, \quad (1)$$

де n – параметр степеня температурного напору. За результатами проведених експериментів за методом найменших квадратів отримано $n = 0,78$ (коефіцієнт пропорційності 1,279

при витраті теплоносія 144,5 кг/год). При цьому отримано практично ідеальний збіг експериментальних та апроксимаційних даних (рис. 4). Для визначення степеня при витраті теплоносія, кг/год, та інших параметрів необхідно виконати експерименти при різній витраті теплоносія.

Висновки. На основі проведених експериментів та отриманих даних можна зробити наступні висновки: проведені експериментальні дослідження дозволяють провести порівняльний аналіз відносно інших (традиційних) опалювальних приладів. Відповідно до отриманих даних провести обґрунтування використання даних типів радіаторів в системах опалення.

Опалювальний пристрій, що працює на основі принципу випаровування та конденсації вторинного теплоносія мають свої переваги і недоліки, порівняно з традиційними радіаторами опалення. До основних переваг можна віднести швидкий та рівномірний нагрів усієї поверхні, значна променева складова передачі теплоти, яка є основною, значно менша кількість теплоносія в системі опалення, низький гідравлічний опір опалювального приладу, відсутність повітряних пробок, простота встановлення, відсутність корозії та засмічування. До недоліків даних опалювальних пристроїв можна віднести складність конструкції, необхідність використання вторинного теплоносія, підвищені вимоги до обробки матеріалів, складність технологічного процесу виготовлення.

Перспективи подальших досліджень. Необхідно провести додаткові експериментальні дослідження в різних режимах роботи, науково обґрунтувати та описати процеси теплообміну.

На основі запропонованих конструкцій вакуумних радіаторів (трубчастого та пластинчастого типів) розробити лінійку типорозмірів для запровадження у виробництво для подальшого його використання в системах опалення.

Література

1. Богословский В. Н. Отопление: учебник для вузов / В. Н. Богословский, А. Н. Сканава. – Москва: Стройиздат, 1991. – 735 с.
2. Сканава А. Н. Отопление / А. Н. Сканава, Л. М. Махов. – Москва: МГСУ. – 2006.
3. Савельев И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – Москва: Наука, 1970. – 510 с.
4. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. пособие / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, В.П. Титов и др.; под. ред. Л.Д. Богуславского, В.И. Ливчака. – Москва: Стройиздат, 1990. – 624 с.

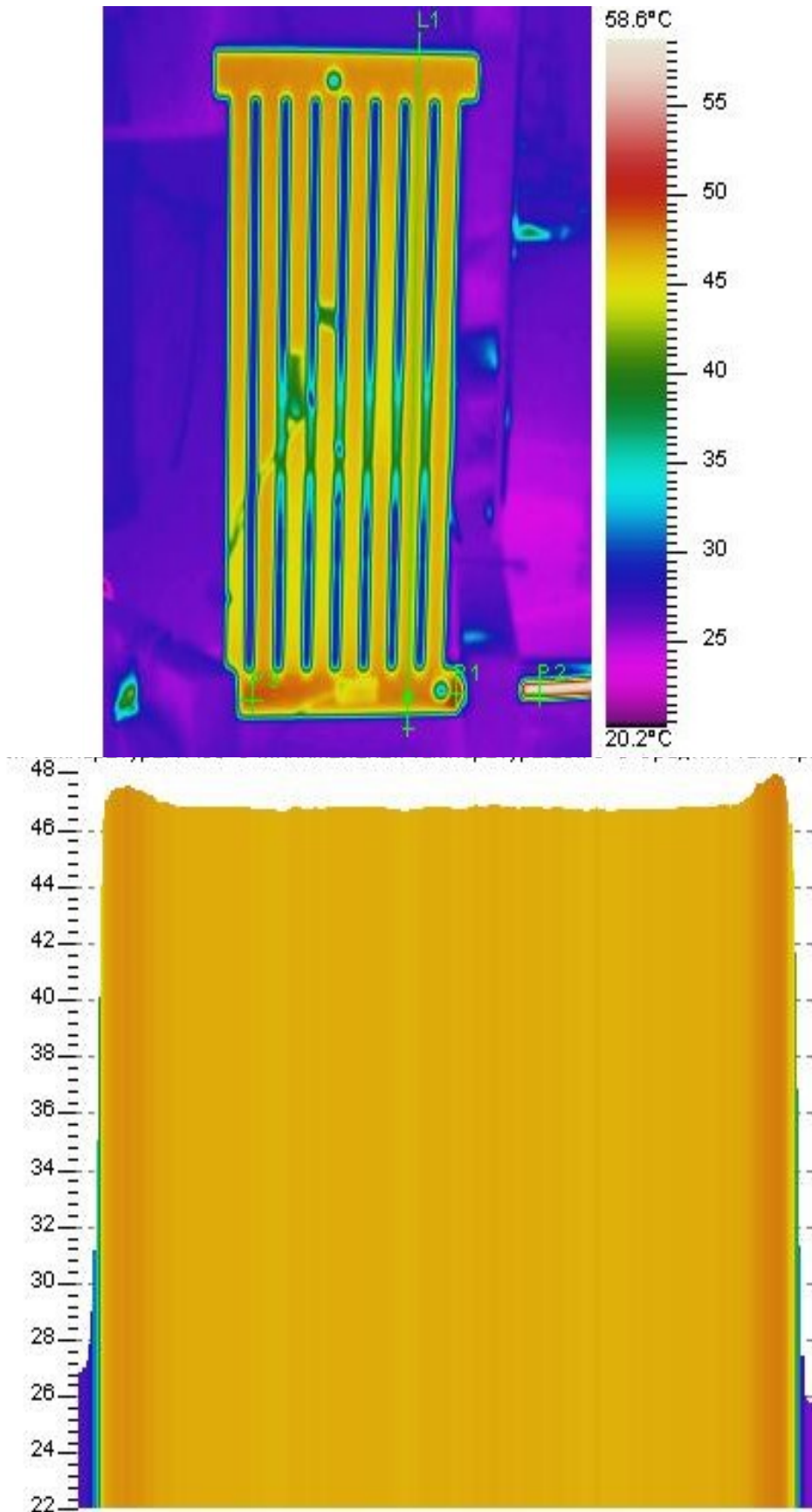


Рис.3. Термограми для опалювального приладу трубчастого типу: мінімальна температура 25,73 °С; середня температура 45,64 °С; максимальна температура 47,96 °С;

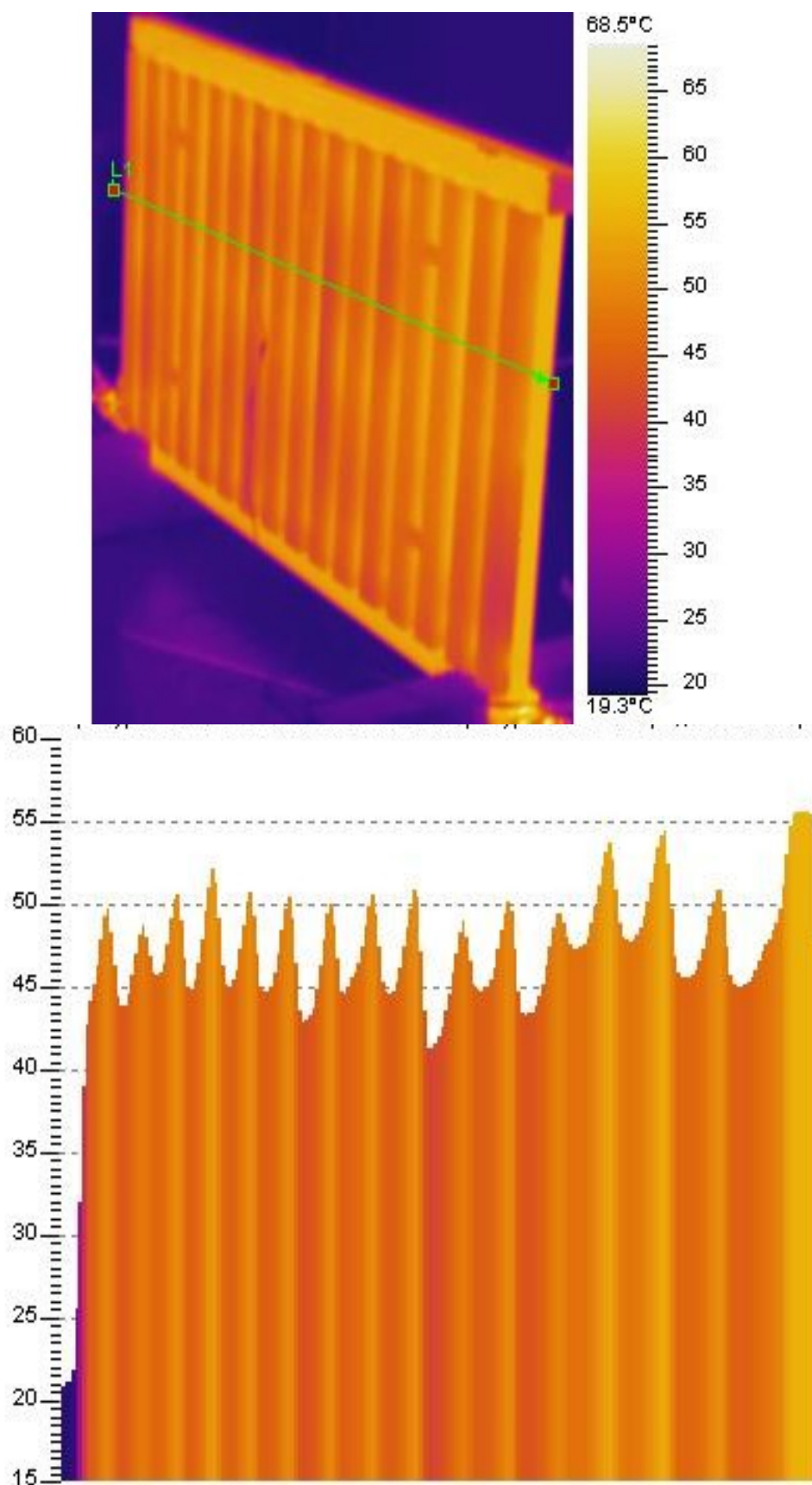


Рис.4. Термограми для опалювального приладу пластинчастого типу: мінімальна температура 20,72 °С; середня температура 46,72 °С; максимальна температура 55,59 °С;

Порівняння теплових потоків різних типів опалювальних приладів

№	Найменування	Площа секції, м ²	Температурний напір між первинним теплоносієм і повітрям			
			30 °С		40 °С	
			Тепловий потік однієї секції, Вт	Тепловий потік з квадратного метра поверхні нагріву, Вт	Тепловий потік однієї секції, Вт	Тепловий потік з квадратного метра поверхні нагріву, Вт
1	Вакуумний радіатор	всієї 0,33	75	227,8	130	410
2	Алюміній 85 Summer/Еkvator	0,3044	90	308,8	120	384,4
3	Біметал 96 MIRADO (алюміній)	0,4008	110	292	135	349,3
4	Біметал 76 Summer/Еkvator, Bitherm	0,3114	78	266,5	95	321,1
5	36 MIRADO, біметал	0,3980	105	268,8	125	324,1
6	«Bitherm» алюмінієвий	0,297	60	202,0	80	269,4
7	«Bitherm» біметалічний	0,2818	60	202,9	79	280,3

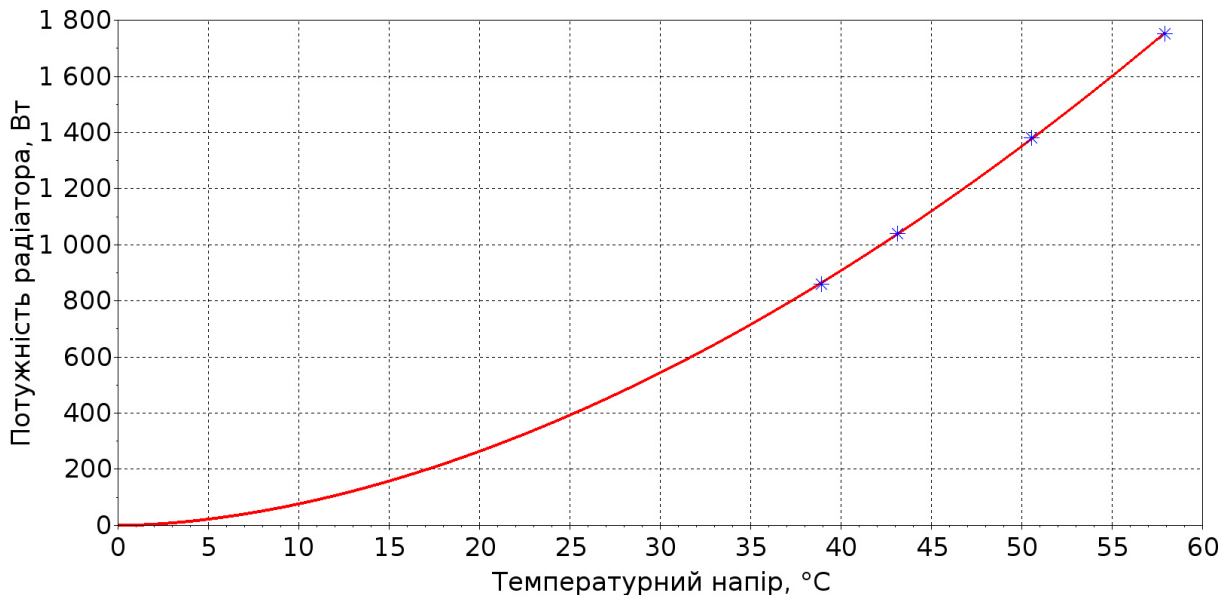


Рис. 4. Експериментальна теплова характеристика вакуумного радіатора при витраті теплоносія 144,5 кг/год: зірки – дослідні дані; суцільна лінія – апроксимація при параметрі $n = 0,78$

5. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 1. Отопление / В. Н. Богословский, Б. А. Крупнов, А. Н. Сканава и др.; Под ред. И. Г. Староверова и Ю. И. Шиллера. – Москва: Стройиздат, 1990. – 344 с.
6. Поденежко Ю. Опалювальний пристрій на основі фазового переходу першого рівня / Ю. Поденежко // Conference proceedings international scientific-practical conference of young scientists "BUILD-MASTER-CLASS-2018", November 2018, Kyiv, Ukraine. – с. 298-299.
7. Власенко А. С. Интенсификация теплообменных процессов в аппаратах теплоэнергетики / А. С. Власенко, Э. Д. Сергиевский // Тезисы докладов 5-й научной школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». Алушта. Украина. 2007.
8. Зайцев О. Н. Проектирование систем водяного отопления / О. Н. Зайцев., А. П. Любарец. – Вена-Киев-Одесса, 2008.
9. Пухкал В. А. Исследование инерционности отопительных приборов / В. А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15191>
10. Пирков В. В. Особливості проектування сучасних систем водяного опалення / В. В. Пирков. – Київ: Такі справи, 2003. – 176 с.
11. Пирков В. В. Danfoss: Одно- і двотрубні системи водяного опалення – гідравлічні і економічні відмінності / В. В. Пирков // Ринок інсталяційний. – 2004. – №3. – С. 46-47.

12. Пат. 108855 Україна МПК(2016.01) B21D 53/02, H05B 1/00, B60H 1/06 Опалювальний пристрій, що працює за рахунок фазового переходу першого рівня випаровування/конденсації / Вознюк В. Т., Бабенко К. С., Поденежко Ю. О. – № у 2016 05952; заявл. 01.06.2016; опубл. 25.07.2016 бюл. №14. – 5 с.
13. СТО НП «АВОК» 4.2.2–2006. Радиаторы и конвекторы отопительные. Общие технические условия. – Москва: АВОК–ПРЕСС, 2006.
14. Отопительные приборы Kermi // truba.ua URL: <http://www.truba.ua/>
15. Украинский рынок радиаторов. Обзор 31.07.2006. Юлия Захаренко-Березьянская <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/463/>.
16. Вакуумные радиаторы отопления: обзор видов, правила выбора + технология монтажа [Электронный ресурс]. – URL: <https://soviet-ingenera.com/otoplenie/radiator-obogrev/vakuumnye-radiatory-otopleniya.html>. – Дата доступа: 29.11.2019

References

1. Bogoslovsky B., Skanavi A. Otoplenie. Stroiizdat, 1991.
2. Skanavi A., Makhov L. Otoplenie. MGSU, 2006.
3. Saveliev I. Kurs obshchei fiziki. Nauka, 1970.
4. Boguslavsky L., Livchak V., Titov V. Energoberezhenie v sistemakh teplosnabzheniia. ventilatsii i konditsionirovaniia vozdukh. Stroyizdat, 1990.
5. Bogoslovsky B., Krupnov, Skanavi A., etc .Vnutrenniye sanitarno-tehnicheskiye ustroystva. Ch. 1. Otoplenie. Stroyizdat, 1990.
6. Podenezhko Yu. “Opaliuvalni prystrii na osnovi fazovoho perekhodu pershoho rivnia.” Conference proceedings international scientific-practical conference of young scientists "BUILD-MASTER-CLASS-2018", November 2018, Kyiv, Ukraine. P. 298-299.
7. Vlasenko A., Sergievskii E. “Intensifikatsiia teploobmennykh protsessov v apparatakh teploenergetiki.” Tezisy dokladov 5-i nauchnoi shkoly-konferentsii «Aktualnye voprosy teplofiziki i fizicheskoi gidrogazodinamiki». Alushta. Ukraina. 2007
8. Zaitsev O., Liubarets A. Proektirovanie sistem vodianogo otopleniia. Vienna-Kiev-Odessa, 2008.
9. Pukhkal B. “Issledovanie inertsionnosti otopitelnykh priborov.” Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia, 2014. no 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15191>
10. Pyrkov V. Osoblyvosti proektuvanniia suchasnykh system vodianoho opalenniia. Taki spravy, 2003. 176 p.
11. Pyrkov V. “Danfoss: Odno- i dvotrubni systemy vodianoho opalenniia – hidravlichni i ekonomichni vidminnosti.” Rynok instaliatsiinyi. 2004. no 3. P. 46-47.
12. Vozniuk V. T., Babenko K. S., Podenezhko Yu. O. “Opaliuvalni prystrii, shcho pratsiuie za rakhunok fazovoho perekhodu pershoho rivnia vyparovuvanniia/kondensatsii.” Patent of Ukraine 108855. 25 June 2016.
13. Radiatory i konvektory otopitelnye. Obshchie tehnicheskie usloviia. STO NP «АВОК» 4.2.2–2006, АВОК–PRESS. 2006..
14. Otopitelnye pribory. truba.ua URL: <http://www.truba.ua/>
15. Ukrainskiy rynok radiatorov. Obzor 31.07.2006. Yuliya Zakharenko-Berezlanskala. <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/463/>.
16. Vakuumnyie radiatory otopleniia: obzor vidov, pravila vybora + tekhnologiiia montazha. <https://soviet-ingenera.com/otoplenie/radiator-obogrev/vakuumnye-radiatory-otopleniya.html>

УДК 697.3.4

Исследование отопительных устройств на основе фазового перехода первого уровня

Ю. А. Поденежко¹, М. А. Кириченко², Н. В. Чепурная³, В. В. Чепурной⁴

¹студ. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, format21@bigmir.net

²к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, kirichenko-m@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-3651-3153

³к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, ChepurnayaNV@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-8044-7563

⁴ст. преп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, м. Киев, Украина, Chepurnoyv@ukr.net

Аннотация. Новые разработки, ориентированные на экономию затрат для обогрева дома, все больше привлекают к себе внимание. Разработка высокоэффективных радиаторов отопления, удовлетворяющих требованиям современных инженерных систем, а именно: экономичности, эффективности, быстрому равномерному нагреву всей поверхности, удобства монтажа и эксплуатации, невысоким затратам на изготовление и долговечности,

является основным направлением в проектировании отопительных устройств. Последние годы в системах отопления городов Украины получают распространение использования отопительных устройств на основе фазового перехода первого уровня. В литературе и интернет ресурсе встречается другое название отопительных устройств на основе фазового перехода первого уровня, а именно – вакуумные радиаторы, и назвали их потому, что из внутренней полости секционной конструкции полностью выкачан воздух. Сделано это для того, чтобы снизить давление и соответственно снизить температуру испарения вторичного теплоносителя. Это обычные отопительные приборы внешне, но совершенно другие по принципу действия. По сути, работа вакуумного радиатора построена по принципу функционирования герметичного двухфазного термосифона. В качестве основного преимущества подобного решения можно отметить уникальную систему циркуляции теплоносителя. Их можно использовать как для централизованных систем отопления, так и для автономных. По поводу целесообразности использования вакуумных радиаторов существуют противоречивые мнения, поэтому их подтверждения или опровержения требует глубоких исследований. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований отопительного устройства на основе фазового перехода первого уровня. В качестве вторичного теплоносителя используется жидкость с низкой температурой кипения. Исследовано принципы работы отопительного устройства, определены тепловые мощности при различных температурах теплоносителя. Проведено сравнение с традиционными стальными и алюминиевыми отопительными приборами. Особое внимание было уделено исследованию вакуумных радиаторов с точки зрения теплообмена и отмечены их необычные свойства. Выявлены основные преимущества и недостатки данного отопительного устройства. Обозначены пути дальнейшего исследования данных типов отопительных приборов.

Ключевые слова: отопление, отопительное устройство, вакуумный радиатор, тепловая мощность, вторичный теплоноситель.

UDC 697.3.4

Study of Heating Devices Based on a First-Order Phase Transition

Y. Podenezhko¹, M. Kirichenko², N. Chepurna³ V. Chepurnyi⁴

¹Student, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, kirichenko-m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3651-3153

³Ph.D, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, ChepurnayaNV@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8044-7563

⁴ Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, Chepurnoyv@ukr.net

Annotation. New developments aimed at saving costs for heating a house are attracting more and more attention. The development of highly efficient heating radiators that meet the requirements of modern engineering systems, namely: cost-effectiveness, efficiency, rapid uniform heating of the entire surface, ease of installation and operation, low manufacturing costs and durability is the main direction in the design of heating devices. In recent years, the use of heating radiators based on first-order phase transition has been gaining ground in heating systems in Ukrainian cities. In the literature and on the Internet resources, there is another name for such kind of the radiators – vacuum radiators. They were named because air was completely pumped out of the internal cavity of the sectional structure. This is done in order to reduce the pressure and, accordingly, reduce the evaporation temperature of the secondary coolant. These are ordinary heating appliances externally, but completely different in principle of operation. In fact, the operation of the vacuum radiator is built on the principle of functioning of a sealed two-phase thermosiphon. The main advantage of such solution is the unique coolant circulation system. They can be used both for heating systems and for autonomous ones. There are conflicting opinions about the advisability of using vacuum radiators, so their confirmation or refutation requires in-depth research. This paper presents the results of experimental studies of a heating radiator based on first-order phase transition. As a secondary coolant, a liquid with a low boiling point is used. The principles of operation of the heating device are investigated, thermal capacities are determined at various temperatures of the coolant. A comparison is made with traditional steel and aluminum radiators. Particular attention was paid to the study of vacuum radiators from the point of view of heat exchange, and their unusual properties were noted. The main advantages and disadvantages of this heating device are revealed. The ways of further research of these types of heating radiators are indicated.

Key words: heating, heating device, vacuum radiator, heat output, secondary heat carrier.

Надійшла до редакції / Received 15.10.2019

ДО 70-РІЧЧЯ КАФЕДРИ ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ І ВЕНТИЛЯЦІЇ

ВІДОМІ ВИПУСКНИКИ КАФЕДРИ



РАДЗІЄВСЬКИЙ Євген Георгійович

генерал-майор, Начальник об'єднання Центрального проектного інституту Міністерства оборони України, Заслужений будівельник України.

Народився 20 лютого 1948 року в м. Києві. Після закінчення з золотою медаллю середньої школи №1 у 1966 р. вступив до Київського інженерно-будівельного інституту. Під час навчання був старостою групи, брав активну участь у житті факультету. Грав за збірну факультету та інституту з Баскетболу. У 1971 р. з відзнакою закінчив Київський інженерно-будівельний інститут за фахом "інженер-будівельник". Працював у Київському філіалі 20 центрального проектного інституту Міністерства Оборони СРСР.

3 листопада 1971 р. служив у лавах армії, після чого повернувся до Київського філіалу 20 ЦПІ. Працював на посадах старшого інженера, керівника групи. У жовтні 1975 р. знову був



Світлина з випускного альбому 1971 р.

призваний до армії і направлений для проходження служби до Київського філіалу 20 ЦПІ на посадах керівника групи, начальника відділу. У червні 1985 р. переведений в читинський філіал 52 ЦПІ Міністерства Оборони СРСР. І лише в листопаді 1990 р. повернувся на рідну землю. Працював на посаді заступника начальника – головного інженера ЦПІ. З жовтня 1992 р. начальник Об'єднання – Центрального проектного інституту Міністерства Оборони України. 1 грудня 1994 р. указом Президента України Л. Кучми було присвоєно військове звання генерал-майора. У грудні цього ж року присвоєно звання Заслуженого будівельника України

У цей час гостро стояла проблема забезпечення житлом воїнів Збройних Сил молодшої держави. Це завдання успішно виконував трудовий колектив ЦПІ, згуртований зусиллями Євгена Георгійовича. Визначними здобутками Об'єднання стали містечка в Києві (Кадетський Гай), Старокостянтиніві та Новоград-Волинському. Саме завдяки невтомній праці Євгена Георгійовича, а він працював без вихідних, завдяки впровадженню нових технологій проектування та господарювання сім'ї військовослужбовців у найкоротші строки заселилися у нові квартири.

Під керівництвом Євгена Георгійовича були запроєктовані та побудовані стратегічно важливі військові об'єкти України, а також цивільні будівлі різного призначення як в Україні так і за кордоном.

12 серпня 1995 р. Євген Георгійович у розквіті сил передчасно помер. Він був освіченою, вихованою, інтелігентною людиною, сумлінно і відповідально ставився до поставлених завдань, завжди був чуйним до потреб товаришів та колег. Світла йому пам'ять!

Дякуємо Об'єднанню – Центральному проектному інституту Міністерства Оборони України та доцентів кафедри охорони праці, канд. техн. наук, полковнику В. Г. Дзюбенку за надану інформацію.

Наукове видання

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 31

Визнаний ВАК України як наукове фахове видання України, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття ступенів доктора і кандидата наук (Наказ Міністерства освіти і науки України № 515 від 16.05.2016 р.)

Збірник «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» представлений на сайті <http://www.nbu.gov.ua> національної бібліотеки НАН України ім. В.І. Вернадського та на сайті КНУБА library.knuba.edu.ua (<http://library.knuba.edu.ua/node/78>).

Підписано до друку 01.12.2019. Формат 60×84 1/8
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 9. обл. вид. арк. 9,67.
Тираж 100 прим. Замовлення № 161117

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36-а т: (044) 360-22-66, 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.

