

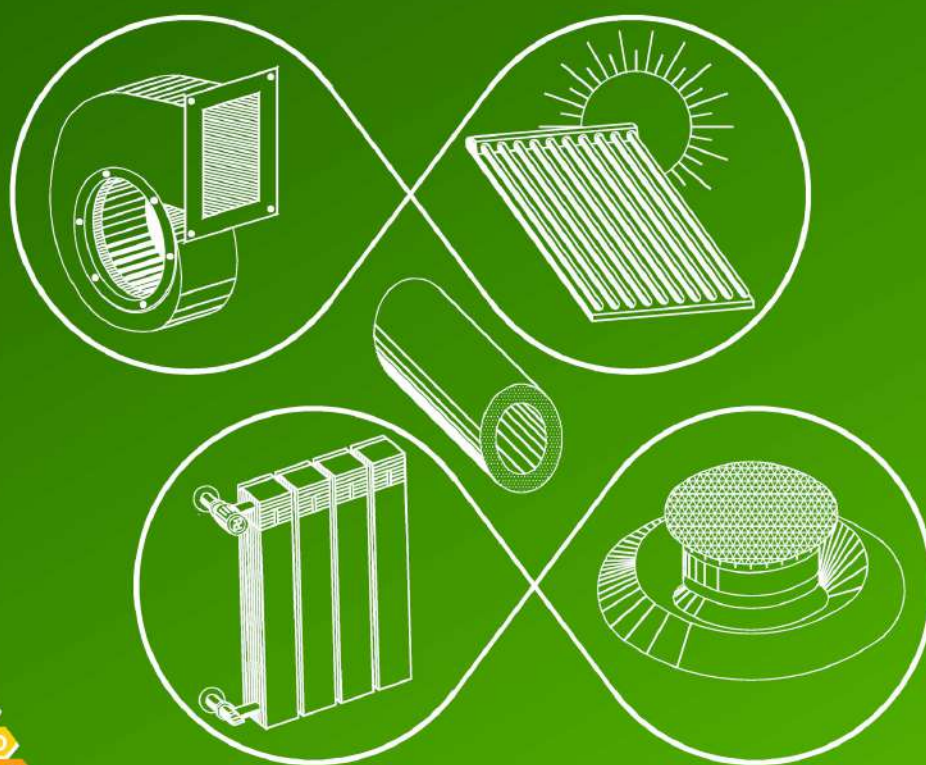


# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2018

Випуск 27



Будівельна та  
муніципальна  
теплотехніка

КИЇВ 2018



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

**VENTYLIATSIIA, OSVITLENNIA  
TA TEPLOHAZOPOSTACHANNIA**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL COLLECTION

*founded in 2001*

ISSUE 27

Kyiv 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

**ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ  
ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*заснований у 2001 році*

ВИПУСК 27

Київ 2018

УДК 697

ISSN 2409-2606

В29

**Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:** науково-технічний збірник. – Вип. 27 / відповідальний редактор Е. С. Малкін. – Київ: КНУБА, 2018. – 79 с.

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

**Редакційна колегія:** докт. техн. наук, професор Е. С. Малкін (відповідальний редактор); канд. техн. наук, професор В. Б. Довгалюк (заступник відповідального редактора); канд. техн. наук, доцент В. О. Мілейковський (відповідальний секретар); докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професор В. П. Корбут; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Міхайленко; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 28 вересня 2018 року, протокол № 16.

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
Ю. В. Човнюк, М. Г. Диктерук, В. Б. Довгалюк, О. М. Скляренко <i>Концептуальні основи створення мехатронних систем керування мікрокліматом музейних приміщень з використанням нечітких логічних контролерів (регуляторів)</i> .....	6
П. М. Гламаздин, М. А. Криворук, Р. Шварценбергер <i>Можливості використання нормативного методу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» для розрахунку жаротрубно-димогарних котлів</i> .....	18
О. С. Волошкіна, В. В. Трофімович, І. В. Клімова, Р. В. Сіпаков, Т. М. Ткаченко <i>Конвективна модель розповсюдження емісії викидів на автотранспортному шляхопроводі при нейтральних метеоумовах</i> .....	23
С. П. Шаповал, В. М. Желих, М. Ulewicz , В.Б.Шепітчак <i>Технології теплозабезпечення енергоефективних будинків із використанням геліоогороджень</i> .....	34
Н. Н. Сороковая, Д. Н. Коринчук, Ю. Н. Кольчик, Р. А. Шапарь <i>Математическая модель и метод расчёта динамики сушки биомассы при производстве пеллет</i> .....	41
Д. В. Гузик, М. П. Єршов <i>Експериментальні випробування лабораторного стенда для дослідження процесів сушіння</i> .....	52
В. О. Петренко, К. Б. Дікарев, А. О. Петренко, І. В. Голякова, І. Ф. Огданський <i>Оцінка параметрів мікроклімату за показниками локального теплового комфорту в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огороджувальних конструкцій</i> .....	61
И. А. Редько, А. А. Редько, А. В. Приймак, А. Ф. Редько <i>Оптимизация параметров тепловой сети при пониженном температурном графике</i> .....	69

## CONTENTS

<i>Information for the Authors</i> .....	5
Yu. Chovniuk, M. Dykteruk, V. Dovhaliuk, O. Skliarenko <i>Conceptual Foundations for Creation of Mechatronic Control Systems for the Microclimate of Museum Premises Using Fuzzy Logic Controllers (Regulators) (in Ukrainian)</i> .....	6
P. Glamazdin, M. Kryvoruk, R. Schwarzenberge <i>Features of Using the Regulatory Method "Thermal Calculation of Boiler Units" for Firetube Boilers (in Ukrainian)</i> .....	18
O. S. Voloshkina, V. V. Trofimovich, I. V. Klimova, R. W. Sipakov, T. M. Tkachenko <i>Convective Model of Emission Distribution on the Road Overpass Under Neutral Weather Conditions (in Ukrainian)</i> .....	23
S. Shapoval, V. Zhelykh, M. Ulewicz, V. Shepitchak <i>Technologies to Provide Heat Energy Efficient Houses with Using Solar Fences (in Ukrainian)</i> .....	34
N. N. Sorokova, D. N. Korinchuk, Ju. N. Kolchyk, R. A. <i>Mathematical Model and Method for Calculating the Dynamics of Drying Biomass at the Production of Pellets (in Ukrainian)</i> .....	41
D. V. Guzyk, M. P. Yershov <i>Experimental Tests of a Laboratory Stand for Research of Drying Processess (in Ukrainian)</i> .....	52
V. O. Petrenko, K. B. Dikarev, A. O. Petrenko, I. V. Holiakova, I. F. Ogdanskii <i>Evaluation of Microclimate Parameters by Indicators of Local Heat Comfort in the Room Which Has Failures of Outside Observing Structures (in Ukrainian)</i> .....	61
I. Redko, A. Redko, A. Priymak, A. Redko <i>Optimization of the Parameters of the Heat Network Under a Reduced Temperature Schedule (in Russian)</i> .....	69

### До відома авторів

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

Закінчуємо публікацію статей за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції “Будівельна та муніципальна теплотехніка”, присвяченої 60-річчю кафедри теплотехніки Київського національного університету будівництва і архітектури.

Звертаємо увагу на неухильне дотримання вимог до рукописів, розміщених на сайті <http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=43>.

Кількість слів анотації має бути суворо 100...250 українською і російською мовами та не менше 1800 знаків англійською мовою, якщо стаття написана українською або російською мовою. Якщо стаття написана англійською, то кількість слів анотації має бути 100...250 англійською і російською мовами та не менше 1800 знаків українською мовою.

Рисунки мають чітко читатися після внесення до тексту. Розмір шрифту на рисунках після внесення до тексту має бути 9...12 пт. Треба уникати світлих кольорів на діаграмах і графіках, особливо жовтого та світло-сірого.

### 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 finish publication of articles on the materials of the international scientific and practical conference "Construction and municipal heat engineering", dedicated to the 60-th anniversary of the Department of Heat Engineering of the Kiev National University of Construction and Architecture.

Pay attention to the strict adherence to the Requirements for manuscripts, placed on the site <http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=43>.

The number of words of the annotation should be strictly 100 ... 250 in Ukrainian and Russian languages and at least 1800 characters in English, if the article is written in Ukrainian or Russian. If the article is written in English, then the number of annotation words should be 100 ... 250 in English and Russian, and at least 1800 in Ukrainian.

Figures should be clearly read after insertion into the text. The size of the font on the figures after making the text should be 9 ... 12 pt. Avoid light colors on charts and charts, especially yellow and light gray.

УДК 681.5.015.8:519

## Концептуальні основи створення мехатронних систем керування мікрокліматом музейних приміщень з використанням нечітких логічних контролерів (регуляторів)

Ю. В. Човнюк<sup>1</sup>, М. Г. Диктерук<sup>2</sup>, В. Б. Довгалюк<sup>3</sup>, О. М. Скляренко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, [ychovnyuk@ukr.net](mailto:ychovnyuk@ukr.net)

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна,

<sup>3</sup>к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [2280170@ukr.net](mailto:2280170@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-4836-5354

<sup>4</sup>к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна,

*Анотація. Для систем керування мікрокліматом музейних приміщень на основі мехатронних засобів розглянутий алгоритм керування, який базується на підтримці бажаного індексу дискомфорту (що є перетином індексів для експонатів музейного приміщення та людського організму) з використання нечіткого логічного регулятора (fuzzy-controller). Для оцінки впливу середовища на експонати й людину в приміщенні музею потрібно визначити не тільки значення окремих параметрів мікроклімату, а й результати їхнього загального впливу. Досліджені існуючі методи комплексного керування мікрокліматом за допомогою мехатронних систем з позиції методів регулювання. Проаналізований підхід щодо визначення індексу дискомфорту. Його значення розбито на діапазони залежно від усереднених відчуттів комфортності умов музейного приміщення для людини (потіку людей) й експонатів. Розглянуті засади теорії нечітких множин (Заде-Сааті). Проведений синтез нечіткого логічного регулятора. Розроблена база даних правил на основі розрахованих значень індекса дискомфорту. Спроектована інтелектуальна система автоматичного підтримання комфортних мікрокліматичних умов у приміщеннях музеїв. На основі розрахованих значень комплексного індекса дискомфорту для всіх можливих варіантів значень температур сухого та зволоженого термометрів побудована база правил для fuzzy-контролера. Керувальна дія мехатронної системи управління мікрокліматом конкретного музейного приміщення виробляється після обробки агрегованої інформації одразу від двох датчиків що зменшує кількість непотрібних увімкнень при малих коливаннях кожного окремо взятого параметра. Одночасно, спеціальні датчики фіксують кількість людей, що знаходяться у приміщенні музею в даний момент часу, й коригують за отриманою інформацією функціонування пристроїв комп'ютерного управління мікрокліматом музейного приміщення. За результатами моделювання відзначено відповідність вимогам отриманої мехатронної системи керування щодо отримання бажаного рівня комплексного індексу дискомфорту в музейному приміщенні, мінімальну кількість увімкнень виконавчого механізму, відсутність перерегулювання та економію електроенергії.*

*Ключові слова: мехатронні системи керування, нечітка логіка, нечіткий логічний регулятор, нечіткий логічний контролер, комплексний індекс дискомфорту, мікроклімат.*

**Вступ.** Розвиток технологій (інформаційних, комп'ютерних, мехатронних) сприяє підвищенню рівня життя людей, у тому числі трансформує урбаністичне середовище у бік підвищення рівня комфорту перебування у будівлях, і при цьому вирішує оптимізаційні задачі споживання енергоресурсів та енергоефективності. Разом з тим, зараз гостро стоїть проблема збереження музейних експонатів (картин, ікон тощо) у належному стані за постійно змінних температурно-вологісних параметрів приміщень, де ці експонати розміщені.

Для керування сучасними системами кондиціонування повітря активно застосовуються принципово нові закони регулювання, що отримали назву «нейротехнології та нечітка логіка» (Neuro&Fuzzy logic) [1]. Подібні системи інтелектуального керування притаманні сучасним мехатронним системам. Критерієм функціонування та метою керування у них є сукуп-

ність параметрів, що визначають комфорт навколишнього середовища для людини за величиною індексів дискомфорту  $D_n$  [1], а також для музейних експонатів, що розміщені у залах, у приміщеннях музеїв та у їх сховищах.

**Постановка проблеми та її актуальність.** Інтелектуальні (на основі мехатронних засобів) системи управління оцінюють параметри мікроклімату в приміщенні (помешкання людини, музей, сховище картин) і автоматично обирають режим роботи відповідних пристроїв, які забезпечують комфортні параметри цього мікроклімату. Вибір ґрунтується на практичному аналізі – за еталон беруться усереднені побажання людей, що користуються цим приміщенням (як відвідувачі музею), а також нормативні показники температури та вологості, котрі необхідні для повноцінного зберігання творів мистецтва в музеях (чи музейних сховищах). Крім того, враховується зміна температурно-вологісних показників у примі-



щеннях музею, де експонуються твори мистецтва, за наявності потоку відвідувачів, які в даний момент часу знаходяться в даному приміщенні (це так званий збурювальний вплив зовнішнього середовища на функціонування інтелектуальної мехатронної системи управління температурою та вологістю приміщення музею). Значення  $D_n$  відображають рівні різноманітних факторів, від значення яких залежить комфорт як людини, так і творів мистецтва в даному приміщенні: температура, вологість, інтенсивність повітряних, температурних, вологісних потоків, які вносяться у приміщення його відвідувачами. Принципова схема інтелектуальності системи управління мікрокліматом приміщення музею (за наявності потоку відвідувачів) наведена на рис.1.

Основним завданням сучасної кліматичної техніки в музеях є створення комфортних умов для життєдіяльності людини й зберігання протягом тривалого періоду часу творів мистецтва. Для оцінки впливу зовнішнього середовища (у даному випадку кількості відвідувачів музейного приміщення), які несуть свої власні (індивідуальні) збурення температури та вологості повітряного середовища на твори мистецтва (і на конкретну людину-відвідувача музею, зокрема) потрібно визначити не тільки кількісну величину окремих параметрів мікроклі-

мату, а й результат їхнього загального впливу на музейні експонати й на людський організм. Деякі значення температури вологості та швидкості повітряних потоків, створених відвідувачами музею в приміщенні, створюють умови, які є некомфортними як для людини, так і для творів мистецтва. Розрахувати вплив одного фактора на твір мистецтва (або на людину-відвідувача) не складно, важче розрахувати вплив поєднання декількох факторів. Для формулювання якісного індекса комфорту можна ввести такі системні оцінки, як теплове навантаження середовища (WBGT) [2] та індекс дискомфорту (ДІ) [3]. Відповідно до індексу дискомфорту, умови змінюються від комфортних до дещо подразнювальних, а потім до нестерпних (при цьому слід **ВІндекс дискомфорту  $D_n$  для людей відвідувачів музейного приміщення** вести комплексний індекс дискомфорту, який враховує дискомфорт не тільки людини, а й творів мистецтва, що знаходяться у приміщенні). Наприклад, при врахуванні впливу вологості на стан людини, що відвідує музей, справедливими є наведені нижче міркування та співвідношення.

Сприйняття теплоти або прохолоди людиною-відвідувачем є наслідком не тільки температури повітря у музейному приміщенні, а і його відносної вологості.



Рис. 1. Інтелектуальна мехатронна система управління мікрокліматом музейного приміщення

Температура повітря 26 °С і відносна вологість (50...60) % вважаються комфортними влітку, тоді як температура 22 °С буде комфортною (для людини) взимку. Однак, навіть температура 29 °С буде знаходитись у зоні комфорту, якщо відносна вологість буде становити 50 %, тоді як та ж температура при відносній вологості 70 % буде сприйматися високою (конкретною людиною) і викликати відчуття «паркості».

У нормативних документах про засоби та методи підтримання оптимальних умов зберігання комплексних музейних колекцій рекомендуються такі параметри температури та відносної вологості: температура повітря  $t = 18 \pm 2$  °С; відносна вологість  $\phi = 50 \pm 5$  %; межі добових коливань температури та відносної вологості внутрішнього повітря не мають перевищувати  $\Delta t = 2...3$  °С,  $\Delta \phi = 3...5$  %.

Для оцінки сучасного впливу температури і відносної вологості на відчуття людиною (відвідувачем музею) дискомфорту введений спеціальний індекс [1] (табл. 1)

Таблиця 1

Ступені дискомфорту (для людини-відвідувача музейного приміщення)

Індекс дискомфорту $D_n$	Ступінь дискомфорту
$\leq 70$	Комфортно
$> 70...75$	Деякі люди почувають себе некомфортно
$> 75...80$	50% людей почувають себе некомфортно
$> 80...85$	Всі люди почувають себе некомфортно
$\geq 85$	Нестерпний дискомфорт

$$D_n = 0,72 (t_{\text{сух}} + t_{\text{вол}}) + 40,6, \quad (1)$$

де  $t_{\text{сух}}$  – температура сухого термометра психрометра;  $t_{\text{вол}}$  – температура зволоженого термометра психрометра.

Саме такий підхід добре узгоджується з логічною системою обробки інформації «нечітка логіка» (Fuzzy logic), яка була запропонована Заде та Сааті й широко застосовується зараз у нечітких логічних регуляторах (НЛР) мехатронних систем керування складними технічними об'єктами. Нечітка логіка (лінгвістична змінна Заде, бальна оцінка висловлювань людей з конкретного приводу Сааті) має переваги у порівнянні з використанням ПД-регуляторів (пропорційних, інтегральних, диференціальних) при обробці експериментальних даних

[1]. Таким чином, актуальною є задача розробки системи керування мікрокліматом у приміщенні з НЛР на основі підтримання бажаного ступеня дискомфорту  $D_n$  (комплексного значення  $D_n$ , що враховує особливості відчуття вологості та температури приміщення музею як його відвідувачем, так і творами мистецтва, розміщеними у цьому приміщенні). Слід зазначити, що використання лише гігрометрів (психрометрів) не дає можливості регулювати мікроклімат приміщення у реальному режимі часу («on-line»), оскільки такі прилади мають високу інерційність і не в змозі оперативно відслідковувати зміни температури й відносної вологості конкретного музейного приміщення, у якому знаходиться потік відвідувачів. Бажано застосовувати у цьому випадку системи мехатронного керування мікрокліматом музейного приміщення, які доволі мало інерційні (запізнення у прийнятті рішень щодо керування мікрокліматом приміщення зазвичай складають десятки, сотні мікросекунд або мілісекунди).

#### Останні дослідження та публікації.

Існуючі методи комплексного керування мікрокліматом з позиції методів регулювання висвітлені у роботах [1...9]. До традиційних методів керування параметрами мікроклімату у приміщенні (помешканні людини, офісі), таких як двопозиційне керування або керування на основі ПД-алгоритму [1, 4], долучилися більш сучасні й складні алгоритми, такі як керування на основі нечіткої логіки [1, 4, 5] та керування за допомогою багатовимірного лінійно-квадратичною цифрового регулятора в просторі стану [7, 8].

Основна перевага нечітких логічних контролерів порівняно з традиційними підходами керування полягає в тому, що для проектування контролера не потрібна математична модель об'єкта керування [4]. Нечіткі контролери розроблені на основі людських знань про поведінку системи. Крім того, контролери, які безпосередньо регулюють мікрокліматичні параметри, мають переваги над традиційними термостатичними системами. Основними перевагами є підвищення комфорту та економії енергії, що досягається завдяки врахуванню більшої кількості параметрів і факторів, які традиційними методами обробляти набагато складніше, на відміну від нечітких регуляторів або нейронних мереж [1]. Ще однією перевагою нечітких логічних регуляторів є стійкість до змін параметрів об'єкта керування, що пояснюється нелінійною природою подібних регуляторів [5].

Інший підхід запропоновано у роботах В.С. Трегуба, І.М. Голінко, І.Є. Галицької [7, 8] та у роботі П.В. Новікова, О.В. Степанця та Р.П. Сакова [6, 9]. У них запропонована методика розробки комплексної математичної моделі промислового кондиціонера у просторі стану. Методика дозволяє отримати комплексну модель промислового кондиціонера як єдиного багатовимірного об'єкта керування. На основі даної моделі запропонована методика синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора, яка враховує логічні перемикання в роботі кліматичного обладнання для модифікованих алгоритмів керування за методами «точки роси». На відміну від існуючих систем, які стабілізують температуру та відносну вологість повітря, запропонована методика регулювання температури та вологості повітря (у т. ч. за допомогою fuzzy-контролерів) дозволяє зменшити, а у деяких режимах усунути взаємозв'язок між параметрами температури та вологості.

**Мета роботи** полягає в обґрунтуванні методів керування системою підтримання мікроклімату приміщень музеїв за допомогою мехатронних засобів типу fuzzy-контролерів (нечітких логічних регуляторів НЛР), які забезпечують якість регулювання температури та відносної вологості вказаних приміщень за наперед визначеними показниками комплексного індексу дискомфорту. Вказаний комплексний індекс дискомфорту враховує з виваженою оцінкою вплив температури та вологості як на твори мистецтва, так і на потік відвідувачів, які перебувають у даному приміщенні музею (у даний поточний момент часу).

**Основні положення теорії нечітких множин** Однозначне визначення оптимальної сукупності параметрів мікроклімату в

реальному часі є складною задачею. Це ускладнює процедуру постановки завдань автоматичним регуляторам. Тому перспективним слід вважати підхід до керування із застосуванням нечіткої логіки. Застосування теорії нечітких множин дозволяє описувати нечіткі поняття і знання, оперувати цими знаннями і робити нечіткі висновки.

Нечітка множина – це сукупність елементів довільної природи, щодо яких не можна з повною впевненістю стверджувати, чи належить той чи інший елемент сукупності, що розглядається. Формально нечітка множина  $A$  визначається як безліч впорядкованих пар або кортежів виду  $\langle x, \mu_A(x) \rangle$ , де  $x$  є елементом деякої універсальної множини, або універсуму,  $E$ , а  $\mu_A(x)$  – функція приналежності, яка ставить кожному з елементів  $x$  універсальної множини деяке дійсне число з інтервалу  $[0,1]$ . При цьому  $\mu_A(x) = 1$  означає, що елемент  $x$  з  $E$  безумовно належить нечіткій множині  $A$ , а значення  $\mu_A(x) = 0$  означає, що елемент  $x$  з  $E$  безумовно не належить нечіткій множині  $A$ .

Структура системи нечіткого виводу наведена на рис. 2. На цій схемі введені наступні позначення: БП – блок правил, ЛВ – логічний висновок, ДФ – дезифікація вихідних змінних, Ф – фазифікація вхідних змінних.

Розробка і застосування систем нечіткого виводу включають у себе послідовність етапів [6]:

1. Формування бази правил (БП) систем нечіткого виводу, призначеної для формального подання емпіричних знань або знань експертів у проблемній області. У системах нечіткого виведення використовуються правила, у яких умови сформульовані і термінах нечітких лінгвістичних висловлювань.

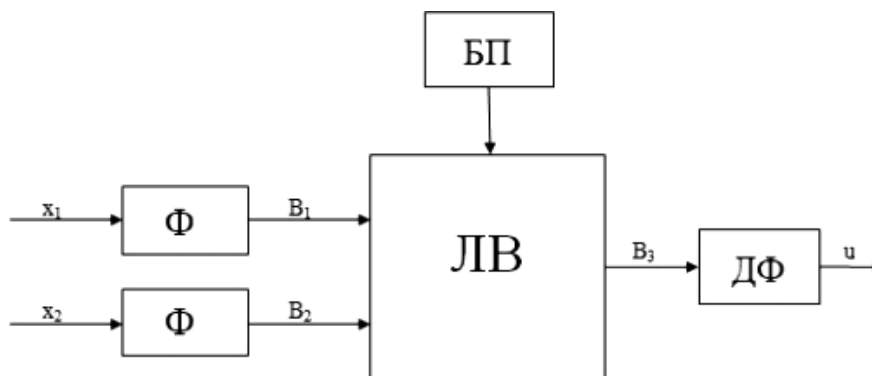


Рис. 2. Структура системи нечіткого виводу:  
 $x_1, x_2$  – вхідні змінні;  $B_1, B_2$  – вхідні нечіткі змінні;  $B_3$  – вихідна нечітка змінна;  $u$  – вихідна змінна

2. Фазифікація (Ф) вхідних змінних – це процедура знаходження значень функцій приналежності нечітких множин (термів) на основі звичайних (чітко визначених) вихідних даних. Метою етапу фазифікації є встановлення відповідності між конкретним значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виведення і значенням функції приналежності відповідного їй значення вхідної лінгвістичної змінної.

3. Операції блоку логічного висновку (ЛВ), що виконує функції, аналогічні функціям обчислювального пристрою в класичній системі регулювання, і визначення ступеня істинності умови за кожним з правил, що зберігаються в базі правил (БП).

4. Дефазифікація (ДФ) вихідних змінних у системах нечіткого виведення – процедура або процес знаходження звичайного (чітко визначеного) значення для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Мета дефазифікації полягає в тому, щоб за результатами логічного висновку отримати значення кожної з вихідних змінних, яке може бути використане спеціальними пристроями, що не належать до системи нечіткого виведення.

**Синтез нечіткого логічного регулятора (НЛР) для системи кондиціонування повітря.** Розглянемо спочатку принцип керування кондиціонером для підтримки індексу дискомфорту  $D_n$  (для людини-відвідувача музейного приміщення) в допустимих межах

По-перше, потужність, з якою повинен працювати кондиціонер для охолодження повітря в приміщенні музею, визначається бажаною температурою в приміщенні. Температура в приміщенні є першою лінгвістичною змінною (НЛР) і може приймати значення «мала», «середня», «велика». Прийmemo діапазон змін температури сухого термометра від 18 °С до 29 °С. (зрозуміло, що для творів мистецтва, які знаходяться в приміщенні музею, ці показники можуть бути іншими).

По-друге, як вже зазначалося раніше, комфортні кліматичні умови в приміщенні визначаються не лише температурою повітря, а і його вологістю. (Особливо це твердження стосується творів мистецтва, зокрема, картин). Тому другою лінгвістичною змінною (НЛР) може бути вологість (абсолютна/відносна), або ж температура зволоженого термометра, яка фігурує у формулі (1) і разом з показами сухого термометра однозначно визначає вологість у приміщенні. Діапазон змін зволоженого термометра будемо розглядати від 8 °С до 28 °С. Можливий діапазон зміни температури зволожено-

го термометра є більшим за діапазон змін сухого термометра, тому й значень лінгвістичної змінної буде більше: «дуже низька», «низька», «задовільно низька», «задовільно висока», «висока», «дуже висока». Відносно творів мистецтва, які знаходяться у даному приміщенні музею, ці оцінки можуть бути іншими, тобто зсунутими в той чи інший бік.

На основі формули (1) і діапазонів змін сухого і зволоженого термометрів сформулюємо (і сформуємо) правила та таблицю індексів дискомфорту (щодо відвідувачів музею) для кожного значення температури. Аналогічні дії будуть виконані нижче щодо творів мистецтва.

У таблиці 2 наведені розраховані індекси дискомфорту  $D_n$  у всьому діапазоні змін температур, а значення згруповані у блоки. Кожен із блоків можна віднести до певного ступеня дискомфорту згідно з табл. 1. Наприклад, блок з «середньою» температурою сухого термометра і «задовільно малою» температурою зволоженого термометра можна вважати таким, у якому забезпечені комфортні мікрокліматичні параметри, тоді як блок, що відповідає «великій» температурі сухого термометра і «великій» температурі зволоженого термометра за значеннями індексів дискомфорту відповідає некомфортним мікрокліматичним умовам. У той самий час блок із «малою» температурою сухого термометра і «дуже малою» температурою зволоженого термометра хоч і відповідає згідно з табл. 1 комфортним мікрокліматичним умовам, але все ж характеризується занадто низькою вологістю (у межах 18 %) що є дуже малим значенням. Тому даний блок також можна охарактеризувати як такий, що не відповідає комфортним умовам для відвідувачів музейного приміщення.

На базі розглянутих міркувань можна побудувати базу правил (БП) для нечіткого регулятора щодо комфортних мікрокліматичних умов для людей-відвідувачів музейних приміщень. У табл. 3 наведена база правил НЛР підтримання комфортного мікроклімату у приміщенні музею для його відвідувачів. Вихідною величиною НЛР є керувальна дія на компресор холодоагенту, якій присвоюється при цьому наступні терми: «велика від'ємна» (NB), «від'ємна» (N), «нульова» (ZE), «додатна» (P), «велика додатна» (PB). Таким чином, при комфортних для відвідувачів музею умовах керувальної дії не відбувається, а компресор працює із заданою потужністю. Структурна схема регулювання мікроклімату у приміщенні музею (по індексу дискомфорту  $D_n$  щодо відвідувачів музею) на базі НЛР наведена на рис.3.

Таблиця 2

Індекси дискомфорту  $D_n$  для людей відвідувачів музейного приміщення

Температура сухого термометра		Температура зволоженого термометра																							
		Дуже мала				Мала				Задовільно мала				Задовільно велика				Велика				Дуже велика			
		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
Мала	18	59	60	61	61	62	63	64	64	65	66	67													
	19	60	61	61	62	63	64	64	65	66	67	67	68												
	20	61	61	62	63	64	64	65	66	67	67	68	69	69											
	21	61	62	63	64	64	65	66	67	67	68	69	69	70	71										
Середня	22	62	63	64	64	65	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72									
	23	63	64	64	65	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74								
	24	64	64	65	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	74	75							
	25	64	65	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	74	75	76	77						
Велика	26	65	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	74	75	76	77	77	78					
	27	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	74	75	76	77	77	78	79	79				
	28	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	74	75	76	77	77	78	79	79	80	81			
	29	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	74	75	76	77	77	78	79	79	80	81	82			

Таблиця 3

База правил НЛР щодо комфортного мікроклімату музейного приміщення для відвідувачів

		Температура зволоженого термометра																							
		Дуже мала				Мала				Задовільно мала				Задовільно велика				Велика				Дуже велика			
		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
Температура сухого термометра	Мала	18																							
		19	N				N				ZE				ZE										
		20	N				N				ZE				ZE										
		21	N				N				ZE				ZE										
	Середня	22	N				ZE				ZE				P				P						
		23	N				ZE				ZE				P				P						
		24	N				ZE				ZE				P				P						
		25	N				ZE				ZE				P				P						
	Велика	26	ZE				ZE				P				P				P						
		27	ZE				ZE				P				P				P						
		28	ZE				ZE				P				P				P						
		29	ZE				ZE				P				P				P						

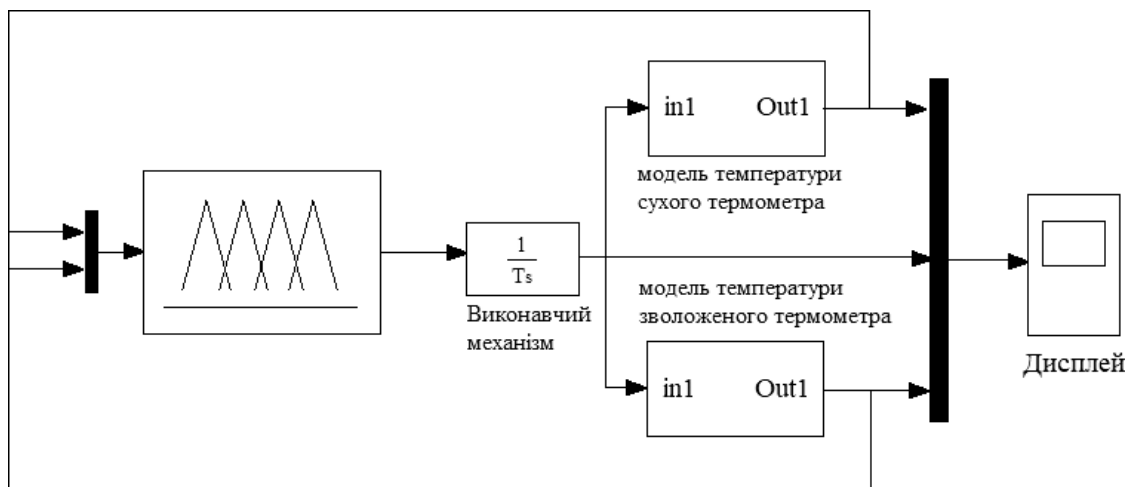


Рис. 3. Структурна схема регулювання мікроклімату в приміщенні музею на базі НЛР (по індексу дискомфорту  $D_n$  для відвідувачів музею).

При наявності відхилень від комфортних умов НЛР виробляє керуючу дію у бік збільшення або зменшення потужності компресора доки, доки не буде компенсоване збурення.

Найбільш простими і розповсюдженими на практиці функціями приналежності (ФП) лінгвістичних змінних є трикутні ФП, математичний опис яких задається у вигляді [4]:

$$\mu_1(u) = (1 - u); \mu_2(u) = u; 0 \leq u \leq 1. \quad (2)$$

У даній роботі тут і в подальшому як алгоритм нечіткого виводу використовується алгоритм Мамдані, або, як його називають у літературі, алгоритм «мінімаксного» виводу. Для розрахунку результатної нечіткої множини вихідної змінної в цьому алгоритмі використовуються операції логічного мінімуму (min) на етапі нечіткого виводу і операції логічного максимуму (max) на етапі композиції.

У блоці дефазифікації отримана результатна функція приналежності для керувального впливу на об'єкт керування перетворюється на числову величину. У даній роботі для отримання «центру тяжіння», у якому чітке числове значення визначається згідно з формулою

$$u_c = \frac{\int_{U_1}^{U_2} u \cdot \mu_c(u) du}{\int_{U_1}^{U_2} \mu_c(u) du}, \quad (3)$$

де  $u_c$  – результат дефазифікації,  $U_1, U_2$  – межі змін лінгвістичної змінної,  $\mu_c(u)$  – результуюча ФП.

Зазначимо, що першочерговим завданням систем формування мікроклімату в музеях є створення комфортних умов для перебування музейних експонатів у них. Зрозуміло, що слід врахувати взаємний вплив тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних системах до яких можна віднести, наприклад, картини, вироби зі шкіри, тканини тощо [10]. Останні зазнають одноосьового навантаження, а також прихованого чи явного розтягу за наявності в приміщенні музею, де знаходяться твори мистецтва, потоку від відвідувачів, які є одним з основних збурювальних факторів температурно-вологісного режиму приміщення музею. Певні значення температури, вологості та швидкості переміщення повітряних мас у приміщенні музею створюють умови, які є шкідливими для музейних експонатів і, як наслідок, призводять до прискорення старіння, спотворення й руйнування їх. Достатньо складно кількісно оцінити вплив поєднання

декількох факторів (температури, вологості, деформації) на музейний експонат. Для формування якісного індексу комфорту для творів мистецтва, які зберігаються у конкретних приміщеннях музеїв, слід увести такі системні оцінки на кшталт теплового навантаження середовища (WBGT) [2] та індексу дискомфорту (ДІ) [3]. Відповідно до індексу дискомфорту, умови перебування музейних експонатів у конкретному приміщенні музею (у т. ч. під впливом наявного потоку відвідувачів) змінюються від оптимальних до допустимих, а вже потім і до умов, коли відбувається деградація матеріалу експонатів. Зазвичай, для оцінки спільного впливу температури й вологості на «відчуття дискомфорту» витвором мистецтва слід ввести індекс [1] типу:

$$D_n^* = \beta_1 (t_{cyx} + t_{eol}) + \beta_2, \quad (4)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – константи, які визначаються експериментально для різних типів музейних експонатів (картини, гравюри, скульптури, gobелени тощо).

Крім того, оцінка впливу на витвір мистецтва збурювальних факторів повинна враховувати ще й тепломасообмінні та деформаційні процеси у дисперсних системах, що призводять до осьових навантажень у матеріалах музейних експонатів та до прихованого або явного їхнього розтягу. Цей вплив можна врахувати методами, запропонованими в роботі [10].

Можна запропонувати наступні міркування. У роботі [10] художнє полотно розглядається у вигляді стрижня, який набрякає при зволоженні й дає усадку при сушці. При нагріванні вважаємо матеріал розширюваним. У відповідності до цього він знаходиться під впливом прихованого видовження в процесі сушки в результаті усадки матеріалу [11]:

$$\Delta l(t) = l - l_0(t), \text{ м}, \quad (5)$$

де  $l_0(t)$  – змінна довжина вільного (не розтягнутого) стрижня/полотна, м, що відповідає його вологовмісту й температурі в момент часу  $t$ , с;  $l$  – фіксована довжина, м, розтягнутого стрижня (у певному напрямку – поздовжньому або поперечному). По суті, полотно картини має два взаємно перпендикулярні напрямки зміни своїх розмірів. У даному випадку розглядаємо в межах моделі стрижня полотно, яке є виродженою системою механічного типу, тобто в одному напрямку, наприклад, вздовж поло-

тна картини розміри набагато більше, ніж у поперечному. Саме тоді справедлива така модель стрижня.

Розтяг  $\varepsilon(t)$  у цьому випадку виявляється змінним у часі  $t$ , с, за рахунок прихованого видовження в процесі сушки (у результаті усадки матеріалу стрижня або полотна), а саме:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta \ell(t)}{\ell_0(t)} = \frac{\ell - \ell_0(t)}{\ell_0(t)} = \left\{ \frac{\ell}{\ell_0(t)} - 1 \right\}. \quad (6)$$

Тоді:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\ell}{\ell_0(t)} \right\} = - \frac{\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\ell}{\ell_0(t)} \right\}}{\left[ \frac{\ell}{\ell_0(t)} \right]^2} \cdot \ell, \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

Експериментальним шляхом можна визначити закони зміни у часі значення  $\ell_0(t)$ , м,  $\varepsilon(t)$ ,  $d\varepsilon(t)/dt$ , с<sup>-1</sup>. Далі, з використанням підходів роботи [10], яка враховує ефект астрингації, можна визначити напруження  $\sigma(t)$ , Па, й  $d\sigma(t)/dt$ , Па/с, що виникають у матеріалі полотна. Потім за універсальною системою рівнянь для  $\Delta T(t)$  й  $m(t)$  визначаємо поточні значення цих функцій (система рівнянь (14) [10]). Тут:  $\Delta T(t) = T(t) - T_c$ , К,  $T(t)$  – температура (поточна) матеріалу полотна, К,  $T_c$  – температура навколишнього середовища, К,  $m(t)$  – поточне (у часі  $t$ , с) значення маси, г, вологи, яка випаровується/поглинається стрижнем/полотном.

Для встановлення закону  $\ell_0(t)$ , м, можна використати оптичні методи визначення розмірів/видовжень або скорочень полотна картини (наприклад, лазерне випромінювання, метод муара тощо). Значення  $\ell_0(t)$ , м, залежить від температури  $T(t)$ , К, й вмісту вологи  $m(t)$ , г, у матеріалі полотна. За відомими  $m(t)$ , г, й  $T(t)$ , К, з рівнянь системи, наведеної у [10], можна визначити індекси дискомфорту полотна  $D_i^*$  і скласти спеціальну таблицю цих індексів для кожного сполучення параметрів  $m$ , г, й  $T$ , К. На основі останньої формулюється база правил нечіткого логічного регулятора (НЛР) підтримання мікроклімату у приміщенні музею.

Взагалі, узагальнений індекс дискомфорту  $D_{узаг}$  повинен враховувати три наступних локальних індекси дискомфорту:

- 1) самого приміщення музею  $D_H^*$ ;
- 2) самого приміщення щодо комфортності перебування у ньому відвідувача музею  $D_H$ ;
- 3) матеріалу музейного експонату  $D_i^*$ .

Таким чином, можна стверджувати, що:

$$D_{узаг} = D_H \cap D_H^* \cap D_i^* \quad (8)$$

Кожний з індексів дискомфорту  $D_H$ ,  $D_H^*$  і  $D_i^*$  локальним критерієм і, на думку фахівців, повинен мати свій пріоритет. Скористаємося роботою [12], де викладений спосіб завдання пріоритету локальних критеріїв за на експертними оцінками вагових коефіцієнтів критеріїв  $D_H$ ,  $D_H^*$  й  $D_i^*$ .

Спочатку визначимо основні характеристики пріоритету. Їх існує три: ряд пріоритету  $I$ , вектор пріоритету  $V = (v_1, v_2, v_3)$  та вектор вагових коефіцієнтів  $\tilde{\Lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ .

**Ряд пріоритету:**  $I$  – впорядкована множина індексів локальних критеріїв:  $I = 1, 2, 3$ . Вважатимемо, що критерій  $D_i^*$  має індекс 1, критерій  $D_H$  має індекс 2, критерій  $D_H^*$  має індекс 3. Ряд пріоритету показує лише якісні відношення домінування критеріїв. Критерій  $D_H^*$  важливіший за критерій  $D_H$ , критерій  $D_H$  важливіший за критерій  $D_i^*$ . Кількісна сторона домінування при цьому вказується окремо.

**Вектор пріоритету**  $V = (v_1, v_2, v_3)$  – трьохмірний вектор, компоненти якого є бінарними відношеннями пріоритетів, що визначають кількісно ступінь переваги за важливістю двох сусідніх критеріїв  $v_q$ ,  $q \in \overline{(1,3)}$  визначає у скільки разів критерій  $D_q$  важливіший критерію  $D_{q+1}$  (зазначимо, що у подальшому  $D_1 = D_i^*$ ,  $D_2 = D_H$ ,  $D_3 = D_H^*$ ). Для зручності подальших розрахунків вважатимемо, що  $v_3 = 1$ . Будь яка компонента  $v_q$  вектора пріоритету  $v$  сукупності локальних пріоритетів, яка впорядкована в сенсі ряду пріоритету  $I$ , задовольняє співвідношенню:  $v_q \geq 1$ ,  $q \in \overline{(1,3)}$ . Згідно з експертними оцінками, вважатимемо, що  $v_q = 4$ ,  $v_2 = 2$ ,  $v_3 = 1$ .

**Ваговий вектор**  $\tilde{\Lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  – трьохмірний вектор, компоненти якого пов'язані співвідношенням [12]:

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_q \leq 1, q \in \overline{(1,3)}; \\ \sum_{q=1}^3 \lambda_q = 1. \end{cases} \quad (9)$$

Компоненти  $\lambda_q$  вектора  $\tilde{\Lambda}$  – вагові коефіцієнти, які визначають відносну перевагу  $q$ -го критерію над іншими.

Практична доцільність завдання вказаних характеристик пріоритету наступна:

1. Спочатку слід задати ряд пріоритету  $I$  (визначають експерти);

2. Задати вектор пріоритету  $V$  (експертна оцінка);

3. На базі значень значень  $I$  та  $V$  задають ваговий вектор  $\tilde{\Lambda}$ . Щоб знайти  $\lambda_q$  використовується формула [12]:

$$\lambda_q = \frac{\prod_{i=q}^k v_i}{\sum_{q=1}^k \prod_{i=q}^k v_i} \quad (10)$$

Для розглянутого в даній роботі випадку маємо

$$\lambda_q = \frac{\prod_{i=q}^k v_i}{\left( \sum_{q=1}^3 \prod_{i=q}^3 v_i \right)}, \quad q \in (1,3) \quad (11)$$

Відповідно, до значень вектора  $v$  ( $v_1 = 4$ ;  $v_2 = 2$ ;  $v_3 = 1$ ) з (11) маємо:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{v_1 v_2 v_3}{v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3} = \frac{8}{11} \approx 0,727; \\ \lambda_2 = \frac{v_2 v_3}{v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3} = \frac{2}{11} \approx 0,182; \\ \lambda_3 = \frac{v_3}{v_1 v_2 v_3 + v_2 v_3 + v_3} = \frac{1}{11} \approx 0,091. \end{cases} \quad (12)$$

За рівняннями (8) і (12) складемо формулу  $D_{узг}$  як адитивного критерію (індексу дискомфорту,

що враховує дискомфортність самого приміщення музею, стану відвідувачів й стану полотна/картини, розміщеної в музейному приміщенні):

$$\begin{aligned} D_{узг} &= \lambda_1 \cdot D_1 + \lambda_2 \cdot D_2 + \lambda_3 \cdot D_3 = \\ &= 0,727 \cdot D_1 + 0,182 \cdot D_2 + 0,091 \cdot D_3 = \\ &= 0,727 \cdot D_1^* + 0,182 \cdot D_H + 0,091 \cdot D_H^* \quad (13) \end{aligned}$$

Для  $D_{узг}$  знову складаємо таблицю індексів дискомфорту, на основі якої формуємо блок правил для системи кондиціонування повітря, ефективності її функціонування й узгодження цього функціонування з логічною системою обробки інформації типу «нечітка логіка» (fuzzy logic), яка застосовується в нечітких логічних контролерах-регуляторах.

Нижче на рис. 4 наведена структурно-логічна схема обробки інформації й визначення бази правил для  $D_{узг}$ .

**Висновки.** Для систем керування мікрокліматом музейних приміщень на основі мехатронних засобів запропоновано алгоритм керування, який базується на підтримці бажаного узагальненого індексу дискомфорту: самого приміщення музею; комфортності відвідувачів музею; матеріалу музейного експонату. Кожен з локальних індексів дискомфорту має свій пріоритет. Найбільший пріоритет має локальний індекс дискомфорту музейного експонату, який визначається шляхом розв'язання рівнянь, що описують взаємний вплив тепло-масообмінних і деформаційних процесів у дисперсних системах

### Література

1. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. – Київ: ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим», 2005. – 560 с.
2. Grahame M. Budd. Wet-bulb globe temperature (WBGT) - its history and its limitations/M.Budd Grahame / Grahame M. Budd // Journal of Science and Medicine in Sport. – 2008. – р. 20-32.
3. Thom E. C. The discomfort index / E.C. Thom // Weather wise. – 1959. – Vol. 12. – pp. 57-60.
4. Logical analysis of Madam-type fuzzy inference. I.Theoretical bases / S.Bova, P.Codara, D. Maccari, V.A. Marra // IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona. – 2010. – pp. 1-8.
5. Fuzzy Expert System to Control the Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems / Siham A.M. Almasani, Wadea A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A.A. Alqubati // International Journal of Engineering Research Technology (IJERT). – 2015. – Vol.4. – pp. 808-815.
6. Новиков С. И. Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций / С. И. Новиков, В. Р. Шахневич, А. В. Сафронов // Вестник ИГЭУ. – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2010. – №4. – С. 72-75.
7. Голінко І. М. Оптимізація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2016. – №1. – С.61-73.
8. Голінко І. М. Аналіз системи керування для штучного мікроклімату за методом «точки роси» / І. М. Голінко, В. Г. Трегуб // Восточно-Европейский журнал передових технологий. – 2011. – №2. – С.53-55.



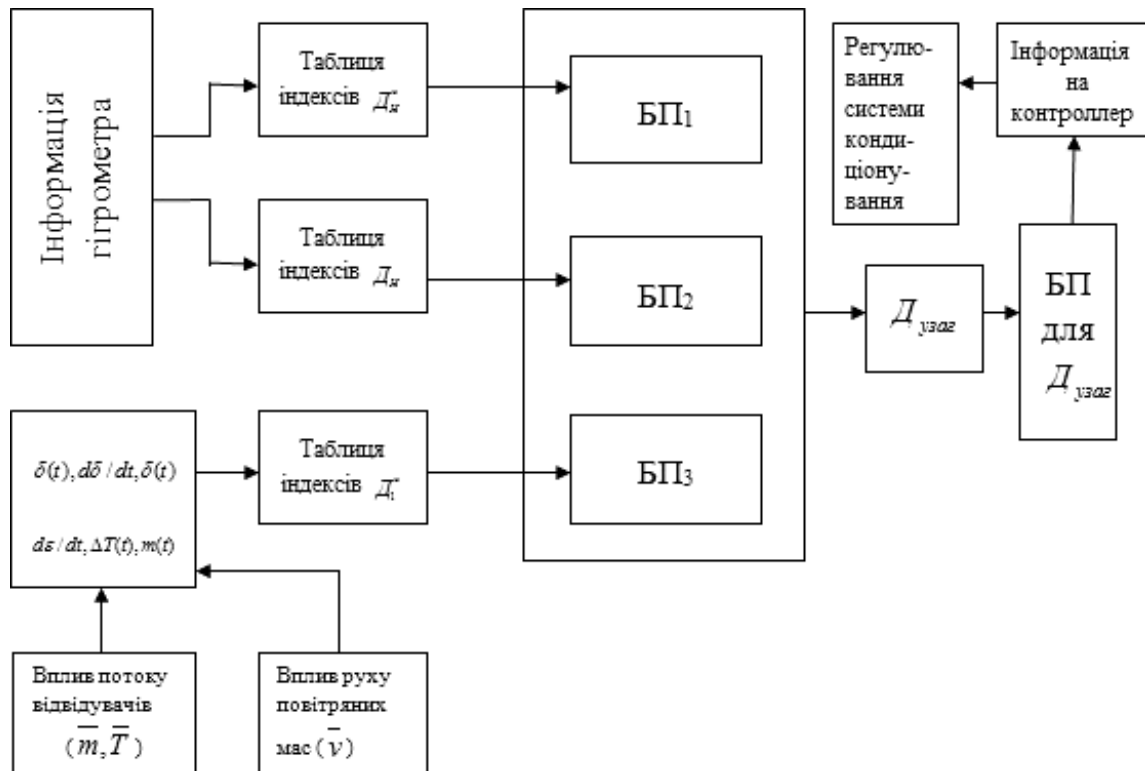


Рис. 4. Структурно-логічна схема обробки інформації та визначення бази правил для нечіткого логічного регулятора контролера (на основі визначення  $D_{uzag}$ ):  $\bar{m}, \bar{T}$  - вологість (маса) й температура потоку відвідувачів,  $\bar{v}$  - швидкість руху повітряних мас (обумовлена системою кондиціонування та впливом потоку людей).

9. П. В. Новиков. Fuzzy-контроллер підтримання мікроклімату в приміщенні за значеннями індексу дискомфорту / Новиков П. В., Степанець О. В., Саков Р. П. // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2017. – Т.9, вип.4. – С. 76-83.
10. Довгалюк В. Б. Концептуальні основи аналізу тепломасообмінних і деформаційних процесів у полімерних дисперсних тілах для формування мікроклімату музеїв / В. Б. Довгалюк, Ю. В. Човнюк // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2017. – Вип. 23. – с. 6-23.
11. Луцкы Р. В. К Теории вязкоструйности дисперсных систем в условиях тепломасообмена / Р.В. Луцкы, Ю. Л. Ментковский, В. П. Холод // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т.58, №4. – С.655-660.
12. Щепотьев О. І. Теорія оптимізації / О. І. Щепотьев, А. В. Жильцов. – Київ: ТОВ ЦП «Компрінт», 2017. – 242с.

#### References

1. Bondar E. S., Gordienko A. S., Mikhailov V. A., Nimich G. V. *Avtomatizatsiya sistem ventilyatsii i konditsionirovaniia vozdukhai*. Avanpost-Prim, 2005.
2. Grahame M. Budd. "Wet-bulb globe temperature (WBGT) - its history and its limitations/M. Budd Grahame." *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2008, pp. 20-32.
3. Thom E. C. "The discomfort index." *Weather wise*, 1959, Vol.12, pp. 57-60.
4. Bova S., Codara P., Maccari D., Marra V. A. "Logical analysis of Madam-type fuzzy inference." *IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona*, 2010, pp.1-8.
5. Siham A. M. Almasani, Wadea A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A. A. Alqubati. "Almasani. Fuzzy Expert System to Control the Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems." *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, 2015, Vol.4, pp. 808-815.
6. Novikov S. I., Shakhnevich V. R., Safronov A. V. "Metody nechetkoy logiki v zadachakh avtomatizatsii teplovykh protsessov na energeticheskikh ustanovkakh." *Vestnik ISEU, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina»*, no. 4, 2010.
7. Golinko I. M., Galitskiy I. E. "Optimizatsiya bakhativimnykh sistem keravannya dlya kompleksa shtuchnogo Mikroklimatu." *Prikarpat'skiy visnik NTSh. Chislo*, no. 1, 2016, pp. 61-73.
8. Golinko I. M., Trehub V. H. "Analiticheskaya sistema keravannya dlya kusochnogo mikroklimata dlya metoda «tochki rosi»." *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, no. 2, 2011, pp. 53-55.
9. Novikov P. V., Stepanets O. V., Sakov R. P. "Nechetkiy kontroller pidtrimannya mikroklimatu v primishchenni"

za znachennikh indeksu diskomfortu.” *Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh i biznes-protsessov*, vol. 9, vip. 4, 2017.

10. Dovgalyuk V. B., Chovnyuk Yu. V. “Kontseptualnaia osnova dlia analiza protsessov teplomassoperenosa i deformatsii v polulineinom rasseivanii dlia formovaniia mikroklimate muzeev.” *Ventyliatsiia, osvittennia ta teploha-zopostachannia: Naukovo-tekhnichniy zbirnyk*, Iss. 23, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2017, pp. 6-23.

11. Lutsyk R.V., Mentkovskiy Yu. L., Kholod V. P. “Teoriya vyzkouprugosti dispersnykh sistem v usloviyakh teplo- i massoobmena.” *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. vol. 58, no. 4, 1990, pp. 655-660.

12. Shchepotiev O. I., Zhiltsov A. V. *Teoriia optimizatsii*. Comprint, 2017.

УДК 681.5.015.8:519

## Концептуальные основы создания мехатронных систем управления микроклиматом музейных помещений с использованием нечётких логических контроллеров (регуляторов).

Ю. В. Човнюк<sup>1</sup>, М. Г. Диктерук<sup>2</sup>, В. Б. Довгальук<sup>3</sup>, О. М. Скляренко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, [yhovnyuk@ukr.net](mailto:yhovnyuk@ukr.net)

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина

<sup>3</sup>к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [2280170@ukr.net](mailto:2280170@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-4836-5354

<sup>4</sup>к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина,

ORCID: 0000-0001-5891-8410

*Аннотация. Для систем управления микроклиматом музейных помещений на основе мехатронных средств рассмотрен алгоритм управления, основанный на поддержании желаемого индекса дискомфорта (который является пересечением индексов для экспонатов музейного помещения и человеческого организма) с использованием нечёткого логического регулятора (fuzzy-controller). Для оценки влияния среды на экспонаты и человека в помещении музея, нужно определить не только значение отдельных параметров микроклимата, но и результат их общего воздействия. Исследованы существующие методы комплексного управления микроклиматом с помощью мехатронных систем с позиции методов регулирования. Проанализирован подход по определению индекса дискомфорта. Его значение разбито на диапазоны в зависимости от усреднённых ощущений комфортности условий в музейном помещении для человека (потока людей) и экспонатов. Рассмотрены основы теории нечётких множеств (Заде-Саати). Проведён синтез нечёткого логического регулятора. Разработанная база данных правил на основе рассчитанных значений индекса дискомфорта. Спроектирована интеллектуальная система автоматического поддержания комфортных микроклиматических условий в помещениях музеев. На основе рассчитанных значений комплексного индекса дискомфорта для всех возможных вариантов значений температур сухого и мокрого термометров построена база правил для fuzzy-контроллера. Управляющее действие мехатронной системы управления микроклиматом конкретного музейного помещения производится после обработки агрегированной информации сразу от двух датчиков, тем самым уменьшая количество ненужных включений при малых колебаниях каждого отдельно взятого параметра. Одновременно специальные датчики фиксируют количество людей, находящихся в помещении музея в данный момент времени, и корректируют полученную информацию функционирования устройств компьютерного управления микроклиматом музейного помещения. По результатам моделирования отмечено соответствие требованиям полученной мехатронной системы управления по получению желаемого уровня комплексного индекса дискомфорта в музейном помещении, минимальное количество включений исполнительного механизма, отсутствие перерегулирования и экономии электроэнергии.*

*Ключевые слова: мехатронные системы управления, нечёткая логика, нечёткий логический (fuzzy-) регулятор/контроллер, комплексный индекс дискомфорта, микроклимат.*

UDC 681.5.015.8:519

## Conceptual Foundations for Creation of Mechatronic Control Systems for the Microclimate of Museum Premises Using Fuzzy Logic Controllers (Regulators)

Yu. Chovniuk<sup>1</sup>, M. Dykteruk<sup>2</sup>, V. Dovhaliuk<sup>3</sup>, O. Skliarenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [yhovnyuk@ukr.net](mailto:yhovnyuk@ukr.net)

<sup>2</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,

<sup>3</sup>PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [2280170@ukr.net](mailto:2280170@ukr.net),

ORCID: 0000-0002-4836-5354

<sup>4</sup>PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,

ORCID: 0000-0001-5891-8410

**Abstract.** *A supervising algorithm based on the maintenance of the desired discomfort index (which is the intersection of two indexes: museum peaces and human body) via a fuzzy-controller dealing with museum premises' microclimate control systems using mechatronic tools. To assess the impact of the environment on the museum peaces and on a person being in the museum premises, it is necessary to determine not only the quantitative value of the microclimate's individual parameters, but also the result of their overall impact on the human body and museum peaces located in this area. The existing methods of integrated microclimate control by means of mechatronic systems are studied with regard to control methods. The value of such a complex index of discomfort is divided into ranges depending on the average sensation of the comfort in the museum room applicable both for the person (human flow) and museum peaces. The fundamentals of the fuzzy sets theory (Zadeh-Saati) are examined. The synthesis of fuzzy logic controller is carried out. The rules database based on the discomfort index's calculated values is developed. An intelligent system for the automatic maintenance of comfortable microclimatic conditions in the museum premises is designed. The rule base for the fuzzy-controller is constructed on basis of discomfort complex index's calculated values for all possible options of dry and humid thermometers' temperature values. The control effect of the mechatronic microclimate control system of specific museum premises is produced after processing of the aggregated information coming simultaneously from two sensors, thus reducing the number of unnecessary inclusions at low oscillations of each specific parameter. At the same time, special sensors detect the number of people located in the museum premises at the given time and they adjust the operation of the computer-controlled microclimate devices designed for museum premises. Subsequent to the results of simulation, it is possible to note the compliance of the received mechatronic control system with the requirements as for obtaining the desired level of the discomfort complex index in museum premises, the minimum number of executive mechanism's inclusions (for the currently available one at a given time and for the number of visitors to the museum premises), the lack of overregulation and the energy savings.*

**Key words:** *mechatronic control systems, fuzzy logic, fuzzy logic regulator/controller, discomfort complex index, microclimate.*

Надійшла до редакції / Received 21.08.2018

УДК 621

## Можливості використання нормативного методу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» для розрахунку жаротрубно-димогарних котлів

П. М. Гламаздін<sup>1</sup>, М. А. Криворук<sup>2</sup>, Р. Шварценбергер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [sib.kiev@gmail.com](mailto:sib.kiev@gmail.com)

<sup>2</sup>студ. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [maristepanenko18@gmail.com](mailto:maristepanenko18@gmail.com)

<sup>3</sup>ген.директор, фірми BBS GmbH, м. Фрайберг, Німеччина

*Анотація. Останні роки в системах централізованого теплопостачання міст України набула поширення практика використання жаротрубно-димогарних водогрійних котлів при заміні водогрійних котлів у опалювальних котельнях після завершення строку експлуатації. При цьому жаротрубні котли можуть бути використані як імпорتنі, так і вітчизняні. Проектування котельних з такими котлами і, особливо, їхнє конструювання часто вимагає проведення теплового розрахунку котла, перевірного або конструктивного. При цьому виникає проблема. Чинний в Україні нормативний документ «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» не містить вказівок щодо розрахунку жаротрубно-димогарних котлів. Він дає настанови з розрахунку водогрійних та парових котлів, до того ж тільки з потужністю більше 75 т/год. Такі настанови не завжди можна використати напряму, безпосередньо. Наприклад, для жаротрубно-димогарних котлів використовуються жарові труби з хвилястою поверхнею стінок. Такий випадок не передбачений в нормативному документі. Серед іншого, виникають труднощі щодо визначення параметру  $M$ , який враховує характер розподілу температури за висотою жарової труби та залежний від відносного місцезнаходження максимальної температури полум'я. Наявність таких проблем обумовлює необхідність розроблення спеціального нормативного документу з рекомендаціями щодо виконання теплового розрахунку жаротрубно-димогарних котлів або додатку до чинного нормативного документу, присвяченого вирішенню цієї проблеми. Сформульовано опис основних проблем, які виникають при виконанні теплового розрахунку жаротрубно-димогарних котлів за допомогою чинного в Україні нормативного документу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів», і показаний шлях їхнього вирішення.*

*Ключові слова: жаротрубно-димогарні котлі, тепловий розрахунок, коефіцієнт теплообміну.*

**Вступ.** Останні роки при влаштуванні групових або квартальних опалювальних котелень малої та середньої потужності систем централізованого теплопостачання або при реконструкції чи розширенні котелень, що експлуатуються, переважно використовуються жаротрубно-димогарні котли, які мають певні переваги в діапазоні малих потужностей (близько до 30 МВт) перед водотрубними котлами, якими оснащені діючі опалювальні котельні [1].

При проектуванні котельні для обґрунтованого визначення необхідної потужності (теплопродуктивності) котлів необхідно провести перевірений тепловий розрахунок для прогнозування робочих параметрів котла, в тому числі ККД і, відповідно, питомої витрати палива в умовах нестационарних, змінних в широкому діапазоні навантажень, що характерно для систем теплопостачання.

Однак, у чинній нормативній базі, зокрема в нормативному методі «Тепловий розрахунок котельних агрегатів», жаротрубно-димогарні котли не розглядаються.

**Актуальність дослідження.** Відсутність нормативної інженерної методики теплового розрахунку жаротрубно-димогарних водогрійних котлів призводить при проектуванні

опалювальних теплогенеруючих установок до завищення потужності прийнятих до установки котлів. У результаті котли працюють не в паспортних режимах, що веде до завищення питомої витрати палива та до скорочення їхнього життєвого циклу і, відповідно, до завищення капітальних вкладень і експлуатаційних витрат. Таким чином, актуальною є задача розроблення доповнень до нормативного методу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» для його використання в тепловому розрахунку жаротрубно-димогарних котлів [2].

**Останні дослідження та публікації.** Оскільки жаротрубно-димогарні водогрійні котли не були традиційними для котелень систем централізованого теплопостачання і не вироблялися масово (крім водогрійних котлів серії КСВ малої потужності – до 3,16 МВт), то процеси теплообміну та гідродинаміки викликають інтерес дослідників на пострадянському просторі. Досліджувалися процеси в топках подібних котлів [3], особливо реверсивних (тупикових), в димогарних трубах, що є конвективною частиною жаротрубно-димогарних котлів [4], зокрема з метою інтенсифікації теплообміну в них [5]. Однак, інформації, присвяченої розробленню узагальненої методики теплового розрахунку жаротрубно-димогарних

котлів у доступних авторам джерелах знайдено не було.

Тепловий розрахунок будь-якого котла згідно з нормативним методом складається з пов'язаних між собою в певній послідовності окремих розрахунків. Більша частина цих розрахунків не може бути використана напряму для жаротрубно-димогарних котлів і потребує уточнень і змін.

При визначенні об'ємів продуктів згорання зайвина повітря не змінюється по всьому газовому тракту і залишається постійною, визначеною в паспорті пальника. При розрахунку втрати з димовими газами  $q_2$  зайвина повітря на виході з котла  $\alpha_{yx}$  залишається рівною її значенню на пальнику  $\alpha_n$ .

При розрахунку теплового балансу втрата в навколишнє середовище  $q_5$  не може бути визначена в тій формі, що пропонує нормативний метод. Ця витрата може бути розрахована за допомогою формули для тепловіддачі природною конвекцією [6]:

$$Nu = c \cdot Gr^m \cdot Pr^n \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^k. \quad (1)$$

Наступний блок розрахунків – розрахунок теплообміну в топці. В цей розрахунок необхідно ввести декілька змін.

Кутовий коефіцієнт екрану  $\chi$  приймаємо рівним одиниці для стінки жарової труби, площа екранування якої дорівнює її площі. Задній екран відсутній ( $\chi = 0$ ), передній екран також можемо прийняти як відсутній, але за необхідності уточнювальних розрахунків площа екранування визначається як площа фронтальної стіни за мінусом площі пальника.

У нормативному методі коефіцієнт забруднення екранів пропонується приймати для природного газу  $\xi = 0,65$ . Забруднення внутрішньої стінки жарової труби має бути набагато меншим, і цей коефіцієнт можна приймати на рівні  $0,8 \div 0,85$ .

Найбільш проблемна зміна – це визначення параметра  $M$  в критерії Больцмана  $Bo$ . Параметр  $M$  призначений для визначення ступеня однорідності температурного поля в топці котла і визначається згідно з нормативним методом за положенням зони з найбільшою температурою, яка, в свою чергу, визначається за положенням пальників на стінках котла. Але конструкції котлів, для яких розроблявся нормативний метод, передбачає вертикальне компонування топки і через це вертикальний розвиток факелу. У нашому ви-

падку топка розташована горизонтально, тобто факел також розвивається горизонтально. Тому використання напряму способу визначення параметра  $M$  за нормативним методом вносить велику похибку в розрахунки. Пошук вирішення цієї проблеми в літературних джерелах виявив одне джерело, де розглядається подібна проблема для котлів серії ДВ та ДКВР, в топках яких факели розвиваються горизонтально [7]. На відміну від пропозиції нормативного методу, розраховувати параметр  $M$  слід за залежністю:

$$M = f \left( x_m = \frac{H_n}{H_m} \right), \quad (2)$$

де  $x_m$  – відношення положення максимуму температури полум'я до висоти жарової труби;  $H_n$  – висота осі пальника, м;  $H_m$  – висота топки, м.

При спалюванні газу в [1] пропонується залежність:

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_m. \quad (3)$$

У [7] відношення положення максимуму температури полум'я пропонується приймати для горизонтально розташованої топки і факелу рівним  $x_m = 0,3$  м. Однак, в котлах серії ДКВР та ДЕ топки мають форму більше або менше витягнутого паралелепіпеда на відміну від циліндричної жарової труби.

**Основна частина.** Для уточнення способу задання параметра  $M$  автори провели чисельне дослідження впливу його значення на критерій Больцмана та через нього на температуру продуктів згорання на виході з топки котла. Розглянуто чотири варіанти (рис. 1) визначення відносного положення максимуму температури. Був прорахований варіант  $x_m = D_m = 1,7$  м. Отримані дані вдалося порівняти з реальними даними, що мають місце в котлі НКВ потужністю 18 МВт фірми BBS (Німеччина). Найбільш близьким результатом розрахунків до реального значення виявився параметр  $M$  на рівні  $x_m = 0,4$  м. Це попередній результат, його треба ще перевірити для інших конструкцій жаротрубно-димогарних котлів.

Отже, з графіку (рис. 2) видно, що чим менше відношення положення максимуму температури, тим більше значення параметра  $M$ , а отже, й температура на виході з жарової труби буде меншою.

Отримана температура димових газів на ви-

ході з жарової труби не повинна відрізнятися від раніше прийнятої на  $\pm 100$  °С, якщо умова дотримана, то розрахунок теплообміну жарової труби вважається закінченим. З чотирьох прорахованих варіантів у тепловому розрахунку жаротрубно-димогарного котла найкращим був четвертий варіант, де параметр  $M$  найбільший серед усіх, а отримана температура на виході з жарової труби відрізнялася від раніше прийнятої менше ніж на  $\pm 100$  °С. Тому розрахунок теплообміну жарової труби вважався закінченим

Розрахунок поворотної камери можна прийняти за пропозицією нормативного методу.

Нарешті, розрахунок теплообміну в димогарних трубах повинен докорінно відрізнятися від того, що пропонує нормативний метод, через різну конструкцію котлів. Нормативний метод розроблений для котлів, у яких продукти згоряння омивають ззовні шахові або коридорні пучки труб повітропідігрівачів або економайзерів, розташованих горизонтально у вертикальних конвективних шахтах. У жаротрубно-димогарних котлах все навпаки – димові гази рухаються всередині горизонтально розташованих у водяному об'ємі димогарних труб. Тому всі залежності для розрахунку конвективної тепловіддачі, що наведені в нормативному методі, стають недійсними для жаротрубно-димогарних котлів. Теплообмін у них описується за залежностями конвективного теплообміну з зовнішнім спонуканням [8]:

$$St = \frac{\dot{\alpha}_n}{\omega_n \cdot \rho \cdot c_p}, \quad (4)$$

де  $\omega_n$  – швидкість потоку оточення, віднесена до одиничної площі поверхні нагріву стінок;  $\rho$  та  $c_p$  – густина та середня теплоємність оточення;  $\dot{\alpha}_n$  – коефіцієнт тепловіддачі.

При цьому може виявитися, що для труб другого та третього ходу рух газів буде не тільки турбулентним, але й перехідним до ламінарного на виході з димогарних труб.

**Висновки.** Аналіз можливості пристосування нормативного методу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» для розрахунків жаротрубно-димогарних котлів показав, що не дивлячись на суттєві відміни конструктивних рішень водотрубних та жаротрубно-димогарних котлів, таке пристосування можливе, але для цього треба внести в чинний нормативний метод описані вище зміни.

**Перспективи подальших досліджень.** Для верифікації та уточнення запропонованих доповнень до нормативного методу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» необхідно провести ряд натурних еколого-теплотехнічних випробувань діючих водогрійних жаротрубно-димогарних котлів різної конструкції. За результатами цих випробувань слід внести уточнення і поправки до запропонованих доповнень, що можуть з'явитися, після чого починати процедуру надання офіційного статусу на рівні доповнення «Настанови» з теплового розрахунку жаротрубно-димогарного котлів

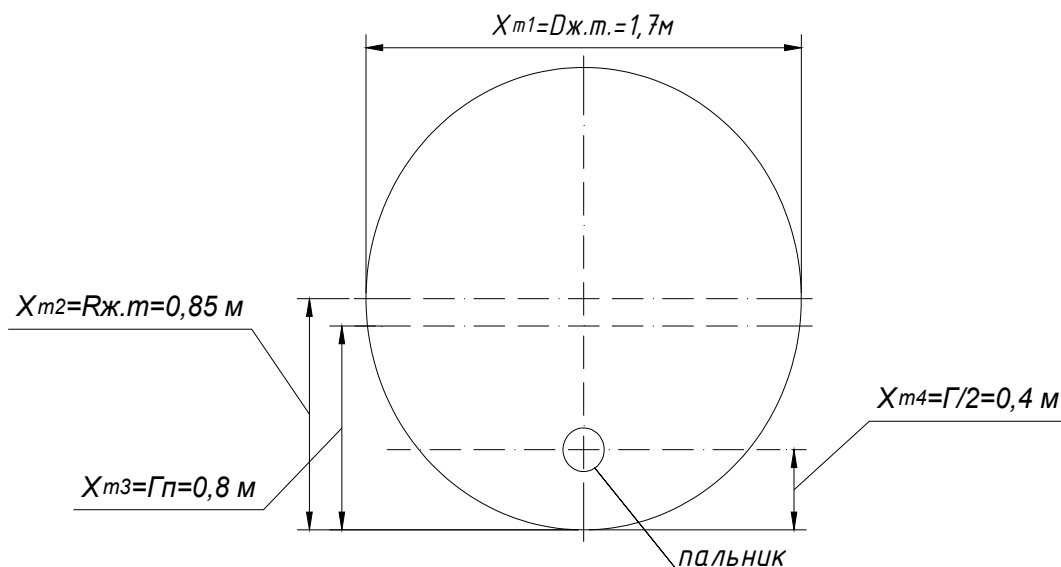


Рис. 1. Визначення відносного положення максимуму температури

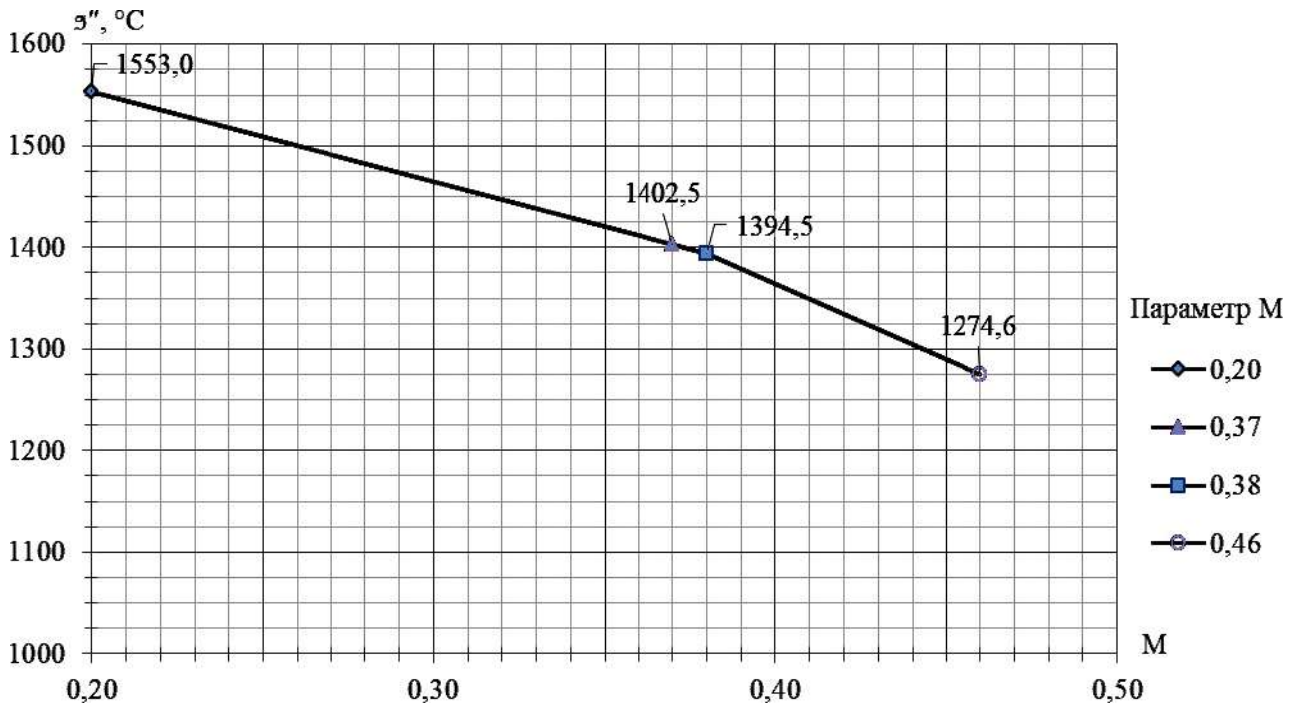


Рис. 2 – Графік залежності температури на виході з жарової труби від параметру М  
де:  $\blacklozenge$  – при  $x_m = 1,7$  м;  $\blacktriangle$  – при  $x_m = 0,85$  м;  $\blacksquare$  – при  $x_m = 0,8$  м;  $\bullet$  – при  $x_m = 0,4$  м

### Література

1. Хаванов П. А. Водогрейные котлоагрегаты малой мощности. Теплотехнические особенности применения / П. А. Хаванов // АВОК. – 2011. – № 5. – С. 66-76.
2. Тепловой расчёт котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н. В. Кузницова и др., Москва: «Энергия», 1973. – 256 с.
3. Верес А. А. О расчете теплообмена в топках жаротрубных паровых и водогрейных котлов / А. А. Верес, О. Г. Сапунов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011 – Т. 73. – № 5. – С. 58-60.
4. Хаустов С. А. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом / С. А. Хаустов, А. С. Загорин, Р. Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 43-47.
5. Степанов Д. В. Експериментальні дослідження теплообміну в жаротрубному водогрійному котлі / Д. В. Степанов, С. І. Ткаченко, Л. А. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 43-45.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. / М. А. Михеев. – Москва: «Энергия», 1977. – 344 с.
7. Щеголев М. М. Котельные установки / М. М. Щеголев, Ю. Л. Гусев, М. С. Иванова. – Изд-во литературы по строительству, 1972. – 384 с.
8. Шорин С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – Издательство «Высшая школа», 1964. – 491 с.

### References

1. Khavanov P. A. "Vodogreinye kotloagregaty maloi moshchnosti. Teplotekhnicheskie osobennosti primeneniia." AVOK, № 5, 2011.
2. Teplovoi raschet kotelnykh agregatov (Normativnyi metod), Energiia, 1973.
3. Veres A. A., Sapunov O. G. "O raschete teploobmene v topkakh zharotrubnykh parovykh i vodogreinykh kotlov." Energoberezhenie i vodopodgotovka, vol. 73, № 5, 2011.
4. Khaustov S. A., Zavorin A. S., Fisenko R. N. "Chislennoe issledovanie protsessov v zharotrubnoi topke s re-versivnym fakelom." Izvestiia Tomskogo politekhnichnogo universitets, vol. 322, № 4, 2013.
5. Stepanov D. V., Tkachenko S. I., Bodnar L. A. "Eksperymentalni doslidzhennia teploobminu v zharotrub-nomu vodogriinomu kotli." Visnyk Vinnytskogo politekhnichnogo instytutu, № 1, 2008.
6. Mikheev M. A. Osnovy teploperedachi. Energiia, 1977.
7. Shchegolev M. M., Gusev, Yu. L., Ivanova M. S. Kotelnye ustanovki. Izd-vo literatury po stroitelstvu, 1972.
8. Shorin S. N. Teploperedacha. Vysshaia shkola, 1964.

УДК 621

## Возможности использования нормативного метода «Тепловой расчет котельных агрегатов» для расчета жаротрубно-дымогарных котлов

П. М. Гламаздин<sup>1</sup>, М. А.Криворук<sup>2</sup>, Р. Шварценбергер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [sib.kiev@gmail.com](mailto:sib.kiev@gmail.com)

<sup>2</sup>студ. Киевского национального университета строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [mariastepanenko18@gmail.com](mailto:mariastepanenko18@gmail.com)

<sup>3</sup>ген. директор, фирмы BBS GmbH, г. Фрайберг, Германия

*Аннотация. Последние годы в системах централизованного теплоснабжения городов Украины получила распространение практика использования жаротрубно-дымогарных водогрейных котлов при замене отслуживших свой эксплуатационный срок водогрейных котлов в отопительных котельных. При этом жаротрубные котлы могут быть использованы как импортные, так и отечественные. Проектирование котельных с такими котлами и, особенно, их конструирование часто требует проведения теплового расчёта котла, или проверочного, или конструктивного. В этом случае возникает проблема. Действующий в Украине нормативный документ "Тепловой расчёт котельных агрегатов" не содержит указаний по расчёту жаротрубно-дымогарных котлов. Он даёт требования к расчёту водогрейных и паровых котлов, к тому же только с мощностью более 75 т/час. Такие требования не всегда можно использовать напрямую. Например, для жаротрубно-дымогарных котлов используются жаровые трубы с волнистой поверхностью стенок. Такой случай не предусмотрен в нормативном документе. Среди прочего, возникают трудности по определению параметра М, учитывающего характер распределения температуры по высоте жаровой трубы и зависящего от относительного местонахождения максимальной температуры пламени. Наличие таких проблем обуславливает необходимость разработки специального нормативного документа с рекомендациями по выполнению теплового расчёта жаротрубно-дымогарных котлов или дополнения к действующему нормативному документу, посвящённого решению этой проблемы. Сформулированы описание основных проблем, которые возникают при выполнении теплового расчёта жаротрубно-дымогарных котлов с помощью действующего в Украине нормативного документа «Тепловой расчёт котельных агрегатов» и показан путь их решения.*

*Ключевые слова: жаротрубно-дымогарные котёл, тепловой расчёт, коэффициент теплообмена.*

UDC 621

## Features of Using the Regulatory Method "Thermal Calculation of Boiler Units" for Firetube Boilers

P. Glamazdin<sup>1</sup>, M. Kryvoruk<sup>2</sup>, R. Schwarzenberger<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [sib.kiev@gmail.com](mailto:sib.kiev@gmail.com)

<sup>2</sup>student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [mariastepanenko18@gmail.com](mailto:mariastepanenko18@gmail.com)

<sup>3</sup>general director, BBS GmbH, Freiberg, Germany

*Abstract. In recent years, the practice of using fire-tube and fire-fighting water-heating boilers in the replacement of service water heating boilers in boiler-houses has become commonplace in the district heating systems of the cities of Ukraine. In this case, fire-extinguishing boilers can be used both imported and domestic. Designing boiler houses with such boilers and especially their construction often requires a heat calculation boiler, either test or constructive, but there is a problem. The normative document "Heat Calculation of Boiler Units" operating in Ukraine does not contain any instructions on calculation of fire-tube and boiler boilers. He gives orders for the calculation of water heaters and steam boilers, in addition, only with a capacity of more than 75 t / h. These guidelines can not always be used directly, directly. For example, for fire-tube and fire-fired boilers, heat pipes with a wavy wall surface are used. Such a case is not provided in the Normative document. There are difficulties in determining the parameter M which takes into account the nature of the temperature distribution along the height of the flue pipe and depends on the relative location of the maximum flame temperature and some others. The presence of such problems necessitates the development of a special regulatory document with recommendations for the heat calculation of fire-fueled boiler boilers or an annex to the current normative document devoted to solving this problem. A description of the main problems that arise during the heat calculation of fire-tube and boiler boilers with the help of the normative document "Heat calculation of boiler units" in Ukraine is presented and the way of their solution is shown.*

*Keywords: fire-tube-smoke boiler, heat calculation, heat transfer coefficient.*

Надійшла до редакції / Received 02.09.2018



УДК 504.064.2

## Конвективна модель розповсюдження емісії викидів на автотранспортному шляхопроводі при нейтральних метеоумовах

О. С. Волошкіна<sup>1</sup>, В. В. Трофімович<sup>2</sup>, І. В. Клімова<sup>3</sup>, Р. В. Сіпаков<sup>4</sup>, Т. М. Ткаченко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [e.voloshki@gmail.com](mailto:e.voloshki@gmail.com)  
orcid.org/0000-0002-8398-0352

<sup>2</sup>к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [v.trofimovich@gmail.com](mailto:v.trofimovich@gmail.com)

<sup>3</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [iklimova@i.ua](mailto:iklimova@i.ua)

<sup>4</sup>асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [shyshyna.mo@knuba.edu.ua](mailto:shyshyna.mo@knuba.edu.ua)

<sup>5</sup>к.т.н., докторант. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com),  
ORCID 0000-0003-2105-5951

*Анотація. Аналіз ступеня забруднення атмосферного повітря на урбанізованих територіях виявив його залежність від зростання кількості особистих автотранспортних засобів, які працюють на традиційному паливі. У роботі доведено можливість застосування теорії конвективної струмини для оцінки та прогнозу забруднення атмосферного повітря мегаполісів залежно від метеоумов та кількості автомобілів, які перебувають одночасно в «заторах» та «тиснях» на автомобільному шляхопроводі. Для розрахунку параметрів конвективної струмини використовуємо інтегральний метод Л. Ейлера. На підставі розглянутих основних шляхів розповсюдження емісій в атмосфері, окреслено умови виникнення нейтрального стану. Авторами представлено методу розрахунку кількості викидів вуглеводнів від автомобільного транспорту, що є підставою для визначення вторинного забруднення формальдегідом атмосферного повітря території мегаполісів внаслідок фотохімічних перетворень. Представлені дослідження дозволяють виділити частку викидів парникових газів від автомобільного транспорту в розрізі загальних викидів мегаполіса. На підставі даної моделі розроблений калькулятор розрахунку концентрації забруднення від автотранспорту. Калькулятор дозволяє використовувати спеціально синтезовані зовнішні впливи з подальшим обробленням результатів спостережень та з наступним аналізом наслідків. Ефективність використання запропонованої математичної моделі може бути збільшена, якщо поєднати її зі застосуванням "зелених конструкцій". Запропонований у роботі підхід стане в нагоді при пошуку оптимальних управлінських рішень на муніципальному рівні та формування екологічної політики міста.*

*Ключові слова: забруднення атмосферного повітря, теорія конвективної струмини, математична модель, викиди вуглеводнів.*

**Вступ.** Підвищена залежність від особистого транспорту визначає його основним джерелом забруднення повітря в ряді мегаполісів. Особливо це стосується країн, які розвиваються [1]. У цих країнах спостерігається пряма залежність між зростанням добробуту населення та кількістю особистого транспорту. За прогнозами Програми ООН щодо населених пунктів, кількість такого транспорту має збільшуватися. До 2050 року кількість транспорту має підвищитися до 2,6 млрд., тобто на 50 % порівняно з 2011 роком.

Для з'ясування ролі транспортних викидів мегаполісів у забрудненні атмосфери в умовах глобальних кліматичних змін необхідно здійснювати масштабні дослідження із залученням даних регіонального та муніципального моніторингу. Необхідні міждисциплінарні інтегровані інструменти оцінки для оптимізації заходів щодо зменшення впливу мегаполісів на здоров'я людей та клімат [2].

У цій роботі автори оцінюють взаємний вплив підвищення температурних умов мегаполіса та ступеня забруднення атмосферного повітря від автотранспорту.

Оцінка ступеня забруднення атмосферного повітря, яка характеризує формування техногенних теплових потоків при нейтральних умовах атмосфери здійснюється шляхом створення математичної моделі.

**Актуальність дослідження.** У практичних дослідженнях важко належним чином обґрунтувати та забезпечити необхідною оперативною інформацією органи прийняття управлінських рішень для оцінки та прогнозу виникнення смогових ситуацій з урахуванням відповідних метеоумов у місцях великого скупчення автотранспорту. Крім того, для забезпечення сталого розвитку мегаполісу необхідний контроль викидів парникових газів від пересувних джерел. Тому актуальними на даний час є дослідження щодо створення моделі забруднення атмосферного повітря та, відповідно, фотохімічних перетворень саме над автотранспортними шляхопроводами.

**Останні дослідження та публікації.** Дослідженням особливостей формування міської кліматичної системи присвячена велика кількість робіт, починаючи з кінця ХХ століття [3,4,5,6].

Одним з важливих факторів формування

міського клімату є антропогенні потоки теплоти над тепловими плямами в місті, які підвищують температуру та утворюють так звані «острови тепла» та «міські камінні труби». І хоча останнім часом спостерігається тенденція до розташування індустріальних підприємств у передмістях, показники техногенних потоків теплоти не зменшуються, що пояснюється наступними факторами, що впливають один на один:

- характером забудови міської території, яка визначає провітрювання та поглинання сонячної енергії з поверхні території;

- збільшенням кількості автомобільного транспорту, який працює на бензиновому паливі (останнім часом «затори» та «тисняви» на великих перехрестях та шляхопроводах стають звичайним явищем для великого транспортного міста та вносять суттєвий вклад у формування техногенних теплових потоків з викидами теплоти від вихлопних газів);

- регіональні прояви глобальних кліматичних процесів та локальні кліматичні ефекти.

Питання підвищення забруднення залежно від температури міського середовища досить детально розглядалося рядом авторів на основі аналізу багаторічних моніторингових даних. Інші автори застосовували підходи, які ґрунтуються на законах хімічної кінетики [7, 8, 9, 10 та ін.].

Всі автори доводять залежність компонентів забруднення атмосферного повітря та фотохімічних процесів від температури повітря, і це не підлягає сумніву. Але відомі на даний час методики моделювання як просторового розподілу забруднення, так і моделі атмосферної дифузії не можуть бути уніфіковані, оскільки існують суттєві відмінності великих мегаполісів, що розглядалися, їхнього мікроклімату, соціально-економічних умов розвитку – і це потребує врахування у моделі великої кількості факторів. Крім цього, сучасні методики оцінки та прогнозу дають змогу реалізувати чисельно забруднення атмосферного повітря урбосистем від стаціонарних або пересувних джерел разом, без належної оцінки кожного джерела окремо. Нині найбільш відомими та поширеними й ефективними вважаються методики, що засновані на реалізації математичних моделей, які базуються на рівняннях математичної фізики з залученням статистичних моделей [11,12]. Як правило, такі прогнози можуть бути застосовані тільки для окремих територій, що розглядаються, із притаманними їм природно-кліматичними особливостями місцевості та рі-

внем розвитку соціально-екологічних структур. Можливості цих відомих моделей дозволяють отримувати тільки відносні оцінки «внеску» окремих джерел (в т.ч. автотранспорту) у загальному забрудненні міської атмосфери (у відсотковому відношенні).

Але в практичних дослідженнях важко належним чином обґрунтувати та забезпечити необхідною оперативною інформацією органи прийняття управлінських рішень для оцінки та прогнозу виникнення смогових ситуацій з урахуванням відповідних метеоумов у місцях великого скупчення автотранспорту. Крім того, для забезпечення сталого розвитку мегаполісу необхідний контроль викидів парникових газів від пересувних джерел. Тому актуальними на даний час є дослідження щодо створення моделі забруднення атмосферного повітря та, відповідно, фотохімічних перетворень саме над автотранспортними шляхопроводами.

Невід'ємною складовою такої оцінки є розрахунковий блок, який дозволив би визначати концентрації викидів вуглеводнів від автомобільних двигунів для оцінки ступеня подальшого перетворення цих викидів у формальдегід, який, як відомо, є індикатором появи фотохімічного смогу від автотранспорту в багатьох мегаполісах. Реалізація такої моделі дозволить робити оцінку та прогноз у задачах інвентаризації парникових газів великих транспортних міст, а також здійснювати оцінку ризику для здоров'я населення, яке перебуває в зоні впливу автомобільних шляхопроводів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даного дослідження є оцінка викидів вуглеводнів над автотранспортними шляхопроводами в міському середовищі на підставі створення математичної моделі формування купола забруднення на перехресті залежно від кількості працюючих двигунів та температури атмосферного повітря.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- провести аналіз існуючих підходів до визначення забруднення атмосферного повітря мегаполісів над автотранспортними шляхопроводами.

- розробити математичну модель, яка дозволяє визначити формування купола забруднення на перехресті при сталих метеоумовах;

- провести апробацію отриманої моделі в залежності від кількості працюючих двигунів та температурних умов.

**Матеріали дослідження.** Основні шляхи розповсюдження емісій в атмосфері формуються при комбінуванні різних метеоумов.

Провідні фактори розповсюдження: середній вітер, турбулентність атмосфери в межах планетарного приземного шару (орієнтовно до висоти 1000 м) і вертикальне розподілення температури (адиабатичне, інверсійне і шарувате різноманітне). Досить спрощено можуть бути названі три головних стани: нестабільний (несприятливий), стабільний (підстилення під інверсійний шар) і нейтральний (конусоподібна нахилена або майже вертикальна струмина). В усіх випадках результати моніторингу атмосфери повинні містити інформацію про зв'язок якості, потужності, кінематичних і геометричних характеристик джерел з показниками забруднення приземного шару і пошкодженням біосфери.

Існує науковий досвід вивчення процесів турбулентної дифузії, починаючи від робіт Г. І. Тейлора, В. Шмидта, А. М. Колмогорова, Д. Л. Лайтмана і включаючи роботи М. Є. Берлянда і В. М. Ельтермана [13, 14, 15 та ін.]. Теоретичні та інструментальні дослідження останніх завершилися створенням на базі К-теорії методики інженерного розрахунку забруднення атмосфери [16]. Методика передбачає визначення концентрації емісії на шляху розвитку струмини на трьох ділянках: перекиду, задимлення (точка падіння на земну поверхню) і поступового зниження концентрації. Первинні забруднювальні речовини не перетворюються на вторинні. Концентрації порівнюються з нормативами екологічної безпеки (система ГДК).

При нейтральних метеоумовах і відсутності хмарного покриву в теплий період створюються умови для атмосферних реакцій і утворення фотохімічного смогу. Компоненти смогу: пари азотної кислоти, пероксиацетилнітрат, формальдегід і озон. Явище смогу вивчалось на основі моніторингових досліджень. З чотирьох компонентів у різних країнах обирають озон (США), пероксиацетилнітрат (Австралія), формальдегід (Україна). Для формальдегіду первинними емітантами є вуглеводні, два види з яких мають природне походження – метан і ізопрен. Третій вид уособлює емісію автомобільних двигунів. Природна емісія формує фоновий рівень концентрацій формальдегіду, але етилен дає змінну складову і залежить від кількості автомобільних засобів, які одночасно перебувають на шляхопроводі.

На рис. 1 представлена схема формування конвективної струмини над авторозв'язкою. В схемі конвективної струмини:  $K$  – секундна кількість руху, Н, яка проходить через переріз, який віддалений на відстані  $Y$ , м, від джерела

теплоти. Приймаємо  $dK = -dAr$ , Н, для елементарного шару завтовшки  $dY$ , м,  $V_K$  – швидкість теплого повітря, м/с,  $A_r$  – архімедова сила, Н,  $D$  – початковий умовний діаметр, м;  $H = 2..3D$  – висота ділянки формування, м.

З використанням критерію Річардсона  $Ri$  розрізняють стабільні  $Ri > 1$ , нестабільні  $Ri < 1$  і нейтральні при  $Ri \approx 1$  умови атмосфери.

Згідно з визначенням  $Ri$  нейтральність настає при врівноваженості факторів дестабілізації і стабілізації атмосфери. Нейтральність стає більш вираженою при зменшенні середнього вітру. Спливання гальмується при поступовому зменшенні різниці густини струмини й навколишнього повітря. Сукупність окреслених явищ обумовлює формування «капельюшка гриба» на кінцевій висоті струмини. Процес формування «капельюшка» буде більш вираженим коли він потрапить в зустрічний «зверху - вниз» процес антициклонічної діяльності при певних синоптичних умовах.

Математична модель є моделлю динамічною та визначає основні параметри забрудненого купола теплого повітря, який формується над автотранспортним шляхопроводом або перехрестям. При його формуванні застосовувалася авторами теорія конвективної струмини з теплої поверхні.

Для розрахунку параметрів конвективної струмини використовуємо інтегральний метод Л. Ейлера. Даний підхід полягає в тому, що зміна кількості вхідних та вихідних рухів потоку в окреслений об'єм дорівнює сумі імпульсів об'ємних активних і реактивних сил.

Виділений циліндричний об'єм обмежується перерізом I-I, що є поверхнею тепловіддачі і концентрування об'єктів емісії (кількість одиниць автотранспорту). Діаметр  $D$ , м, призначається відповідно до розмірів транспортно-го вузла. Переріз II-II відповідає межі ділянки формування і основної ділянки конвективної струмини. Діаметр верхньої межі виділеного об'єму орієнтовно дорівнює діаметру  $D$ , м. Бічна поверхня циліндрична, для якої всі вектори підтікання повітря для формування конвективної струмини перпендикулярні вертикальній осі системи. Кількість теплоти за площею перехрестя або шляхопроводу  $S$ , м<sup>2</sup>, з умовним діаметром  $D$ , м, визначається залежністю:

$$Q_s = (\pi D^2 / 4) \cdot (R_a + R_c + R_t), \text{ МДж}, \quad (1)$$

де  $R_a$ ,  $R_c$  та  $R_t$  – відповідно, розсіяна й пряма радіації місцевості, що розглядається для заданого календарного місяця, та теплота яка



Теплоту від автомобілів знаходимо відповідно за залежністю:

$$Q_a = q_a \cdot N \cdot 40000, \text{ МДж}, \quad (2)$$

де  $q_a$  – середня витрата палива для одного автомобіля на 1 м шляху, л,  $N$  – кількість автомобілів, що визначається за кількістю смуг:

$$N = \frac{n \cdot L'}{\ell_{\text{авт}} + L}; \quad (3)$$

$\ell_{\text{авт}}$  – довжина автомобіля, м;  $n$  – кількість автомобільних смуг на шляхопроводі,  $L'$  – довжина однієї смуги, м, 40000 МДж/л – теплота, що розсіюється в навколишнє середовище на кожен літр бензину. У часи максимального завантаження (часи пік), робимо припущення щодо інтервалу між автомобілями  $L = 20$  м. Тоді на 1 км шляху в часи пік припадає 40 автомобілів:

За джерелом [17] можна знайти типовий склад вихлопних газів (вуглеводні  $\text{CH}_{1,85}$ ) за типом двигуна. Так, для сучасного автомобільного двигуна ця величина становить 7,5 г/(кВт·год).

При розрахунках середньої кількості викидів від автотранспорту приймаємо середню потужність одного автомобіля 100 кВт та рівномірний заїзд і виїзд з транспортного вузла автомобілів зі швидкістю 60 км/год.

Різницю між середньою температурою повітря на поверхні транспортного вузла та найвужчому перерізі теплової струмини, що підіймається вгору, а також середню швидкість повітря знаходимо за формулами конвективної теплопередачі:

$$\Delta t_{\text{уср}} = \frac{41 \cdot Q_s^{2/3}}{(y - y_0)^{5/3}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

$$V_{\kappa} = 0,56 \left( \frac{Q_s}{y - y_0} \right)^{0,33}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

де  $y - y_0$  – відстань від поверхні землі до найвужчого перерізу струмини конвективної теплоти, яке підіймається вгору, м.

Згідно з теорією конвективної струмини, формули (4) і (5) справедливі за умови  $y = 5D$ , однак для попередньої оцінки вони дають задовільні результати при  $y > y_0 = 2D$ .

Слід також мати на увазі, що наведені

формули застосовуються для конвективної струмини над прямокутним джерелом теплоти при співвідношенні сторін менш як 20, або над джерелом з співвідношенням сторін близькому до одиниці. У випадку шляхопроводу приймаємо умовний діаметр струмини, який окреслює площу, яка розглядається і відповідає даним вимогам.

Концентрація вуглеводнів від заданої кількості автотранспорту  $C_{\text{CH}}$  знаходиться в найвужчому перерізі забрудненої струмини.

#### Обговорення результатів дослідження.

У середовищі Excel 2016 запрограмовано зручний калькулятор розрахунку концентрацій забруднення від автотранспорту (рис. 3). У м. Києві на підставі розробленого за даною методикою калькулятора забруднення атмосферного повітря розраховані автомобільні перехрестя та автошляхопроводи. Розрахунки для найбільш забруднених шляхопроводів м. Києва показали, що концентрація в найвужчому перерізі забрудненого струмини, як правило, не перевищує 1 мг/м<sup>3</sup> та при зіставленні з даними моніторингових досліджень дає задовільні результати, похибка яких не перевищують 5% [9].

На рис. 2 представлено фрагмент розрахунку для липня місяця з середньої температурою 20,4 °С, коли на шляхопроводі знаходиться «в тисняві» одночасно 300 транспортних засобів з карбюраторними двигунами та графік залежності викидів вуглеводнів від кількості автомобілів на шляхопроводі. Ця залежність дозволяє прогнозувати внесок збільшення кількості особистого транспорту міста в розрізі глобальних кліматичних змін.

#### Можливості подальшого використання отриманих результатів.

Слід також відмітити необхідність подальших досліджень щодо розгляду інших шляхів емісій у питаннях забруднення атмосфери. Також необхідний подальший розвиток питань оцінки й прогнозу появи фотохімічного смогу над автотранспортними шляхопроводами залежно від основних впливових факторів цього процесу, і, в першу чергу, від температурних умов. Дані дослідження можуть бути використані при прийнятті оптимальних управлінських рішень на муніципальному рівні для ряду науково-практичних задач міста, а саме:

- оцінка викидів парникових газів від автотранспортних засобів;
- вплив даних викидів міста в розрізі глобальних кліматичних змін;
- оцінка ступеня екологічної безпеки міського середовища та ризику для здоров'я населення,

особливо на межі житлової забудови;

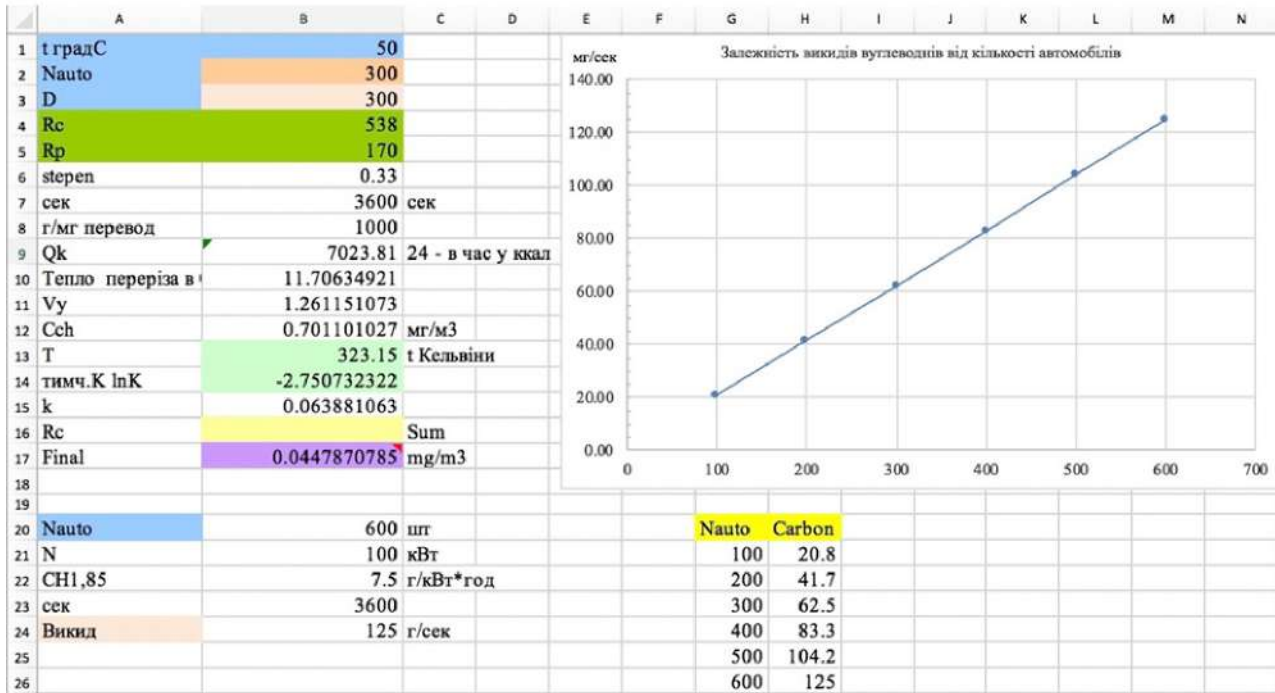


Рис. 3. Калькулятор залежності викидів вуглеводнів від кількості автотранспорту на шляхопроводі

– розробка нормативної бази та технологічних рішень щодо заходів пом'якшення наслідків кліматичних змін та поліпшення якості повітря;  
 – розробка планів та концепцій соціально-економічного розвитку міста.

Ефективність використання запропонованої математичної моделі може бути збільшена в поєднанні зі застосуванням "зелених конструкцій". Природним біологічним фільтром, який регулює забруднення повітря, є рослини. Вегетативні органи рослин сприяють осадженню пилоподібних частинок, поглинанню парникових газів, насиченню повітря киснем і фітонцидами. Завдяки випарному охолодженню рослини здатні знижувати температуру повітря для зменшення "ефекту теплового острова" урбоценозів.

У зв'язку з розростанням урбоценозів по горизонталі та вертикалі, кількість повноцінних зелених зон різко скорочується. Особливо страждають центральні міські райони з ущільненою забудовою і інтенсивним транспортним рухом. Вирішити дану проблему можливо за допомогою технологій "зелених конструкцій", під якими ми розуміємо архітектурно-будівельні елементи, поєднані з живими рослинами: покрівельне озеленення, фасадні зелені блоки, вертикальне озеленення, екопарковки, зелені схили. Біомаса цих технологій здатна активно секвеструвати CO<sub>2</sub>.

Нами розроблена методологія розрахунку накопичення біомаси "зеленими конструкція-

ми" і секвестрації нею CO<sub>2</sub> [18]. У перспективі планується проведення додаткових досліджень у даному напрямку.

**Висновки.** Огляд результатів моніторингових досліджень дозволив виявити закономірні процеси розподілення на урбанізованих територіях забруднювачів атмосферного повітря. Для великих транспортних міст найбільш потужним виявився формальдегід. Це викликало необхідність виділити фотохімічні перетворення та визначити структуру можливих варіантів перенесень. Формування як переважного фактора формальдегіду мало необхідні умови: наявність попередників (летючих вуглеводнів різного походження), температури атмосфери річний хід температур і температури теплового періоду), сонячного випромінювання (періоди ясних і хмарних днів).

Для створення передумов підвищення рівня екологічної безпеки навколо транспортних розв'язок м. Києва, запропонована математична модель оцінки стану атмосферного повітря над місцями великого скупчення автотранспорту. Кількість викидів вуглеводнів від автотранспортних засобів, яке отримано згідно з запропонованою моделлю, дозволяє врахувати ризики виникнення фотохімічного смогу при різних комбінаціях метеоумов місцевості (коли на природні процеси в атмосфері накладаються антропогенні емісії), а також оцінити частку викидів від автотранспорту в загальному об'ємі парникових газів міста. Результати досліджень

апробовані на основних автомобільних шляхопроводах м. Києва. Отриманий задовільний результат зіставлення даних розрахунків з моніторинговими дослідженнями в м. Києві дає підстави рекомендувати даний підхід для оцінки та прогнозу рівня екологічної безпеки атмосферного повітря на автомобільних шляхо-

проводах при формуванні екологічної політики міста. Одним з напрямків поліпшення екологічної безпеки міст є використання «зелених конструкцій», поєднаних з рослинами. Вони здатні секвеструвати CO<sub>2</sub> та знижувати температуру за рахунок «охолоджувального ефекту» рослин.

### Література

1. Города и изменение климата: Глобальный доклад о населенных пунктах 2011года / Программа ООН по населенным пунктам (ООН-Хабитат). Елект. доступ: <http://www.unhabitat.org/grhs/2011>.
2. Megacities and climate change- A brief overview / Gerd, A., Folberth, Timothy, M., Butler, William, J., Collins, Steven, T., Rumbold // Environment Pollution. – 2015. – №203. – с. 235-242.
3. Richard C. Flagan. Fundamentals of air pollution engineering / Richard C. Flagan, John H. Seinfeld. – California Institute of Technology, by Prentice-Hall, Inc. A Division of Simon & Schuster, Printed in the United States of America, 1988. – 542 p.
4. John H. Atmospheric chemistry and physics / John H., Seinfeld Spiros, N. Pandis. – A Wiley-Interscience Publication, Printed in the USA, QC879.6. S45,1997. – 1356 p.
5. Howard Brigman. Global air pollution, problems for the 1990s. / Howard Brigman. – CBS Publishers & Distributors, 1992. – 261 p.
6. Monitoring of atmospheric air. Problems of modeling and forecasting / V. V. Trofimovich, O. S. Voloshkina, M. M. Fandikova, I. V. Klimova, N. E. Zhuravska // Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management" / KNUBA, ITGIP NANU. – 2012. – № 10. – pp. 102-120.
7. Polishchuk S. Z. Estimation of the influence of meteorological factors on the state of atmospheric air pollution in the city of Dnipropetrovsk (on the example of formaldehyde) / Polishchuk S. Z., Dotsenko L. V., Demidenko A. S. // Construction, materials science, machine building: Starodubsky Readings. – 2015. – P.266-270.
8. Pryschevov O. F. Peculiarities of the dispersion of harmful substances of airborne vehicle emissions in the city / Pryschevov O. F., Levytska O. S. // Scientific works of the Petro Mohyla Black Sea State University. Ser Technogenic safety. – 2009. – iss. 98. – pp.139-146.
9. Sipakov R. V Assessment and forecast for the creation of photochemical smog over transport overpasses in Kyiv / Sipakov R. V., Trofimovich V. V., Voloshkina O. S., Bereznitskaya Y. O. // Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management" / KNUBA, ITGIP NANU. – 2018. – № 25. – pp. 44-51.
10. Aloyan A. E. Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere / Aloyan A. E. – Moscow: Nauka, 2008. – 415 p.
11. Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors / T. S. Selegay, N. N. Filonenko, V. A. Shlychkov, A. A. Lezhenin, T. N. Lenkovskaya // Optics of the Atmosphere and the Ocean. – 2013. – № 25(5). – pp. 422-426.
12. Андропов К. М. Пространственное распределение выбросов автотранспорта в крупных промышленных городах / К. М. Андропов // Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий». – 2011. – с. 11-17.
13. Эльтерман В. М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях / В. М. Эльтерман. – Москва: Химия, 1985. – 160 с.
14. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб.пособие для вузов / В. Н. Талиев. – Москва: Стойиздат, 1979. – С.295.
15. Berlyand M. E. Manual on the control of atmospheric pollution / M. E. Berlyand, G.I. Sidorenko. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. – 448 p.
16. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромет. – Ленинград. Гидрометеоздат, 1986. – 90 с.
17. Atmosphere protection from industrial pollutions: ed. S. Kalvert and G. M. Inglund. – Moscow, 1988. – 760 p.
18. Ткаченко Т. М. Роль «зелених конструкцій» у зменшенні екологічного відбитку урбоценозів / Т.М. Ткаченко, О. С. Волошкіна // 5-й Міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»: збірник матеріалів. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – С. 31.

### References

1. *Goroda i izmenenie klimata: Globalnyi doklad o naseleennykh punktakh 2011goda. Programma OON po naseleennykh punktakh (OON-Khabitat)*. <http://www.unhabitat.org/grhs/2011>.
2. Gerd, A., Folberth, Timothy, M., Butler, William, J., Collins, Steven, T., Rumbold "Megacities and climate change-A brief overview." *Environment Pollution*, no. 203, 2015.
3. Richard C. Flagan, John H. Seinfeld. *Fundamentals of air pollution engineering*. California Institute of Technology, by Prentice-Hall, Inc. A Division of Simon & Schuster, Printed in the United States of America, 1988.
4. John H., Seinfeld Spiros, N. Pandis. *Atmospheric chemistry and physics*. A Wiley-Interscience Publication, Printed in the USA, QC879.6. S45,1997.
5. Howard Brigman. *Global air pollution, problems for the 1990s*. CBS Publishers & Distributors, 1992.
6. V. V. Trofimovich, O. S. Voloshkina, M. M. Fandikova, I. V. Klimova, N, E. Zhuravska. "Monitoring of atmospheric air. Problems of modeling and forecasting." *Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management"*, no. 10, KNUBA, ITGIP NANU, 2012, pp. 102-120.
7. Polishchuk S. Z., Dotsenko L. V., Demidenko A. S. "Estimation of the influence of meteorological factors on the state of atmospheric air pollution in the city of Dnipropetrovsk (on the example of formaldehyde)." *Construction, materials science, machine building: Starodubsky Readings*, 2015, pp. 266-270.
8. Pryshepov O. F., Levytska O. S. "Peculiarities of the dispersion of harmful substances of airborne vehicle emissions in the city." *Scientific works of the Petro Mohyla Black Sea State University. Ser Technogenic safety*, iss. 98, 2009, pp.139-146.
9. Sipakov R. V., Trofimovich V. V., Voloshkina O. S., Bereznitskaya Y. O. "Assessment and forecast for the creation of photochemical smog over transport overpasses in Kyiv." *Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management"* no. 25, KNUBA, ITGIP NANU, 2018, pp. 44-51.
10. Aloyan A. E. *Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere*. Nauka, 2008.
11. Selegay T. S., Filonenko N. N., Shlychkov V. A., Lezhenin A. A., Lenkovskaya T. N. "Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors." *Optics of the Atmosphere and the Ocean*, no. 25(5), 2013, pp. 422-426.
12. Andropov K. M. "Prostranstvennoe raspredelenie vybrosov avtotransporta v krupnykh promyshlennykh gorodakh." *Sbornik trudov III Vserossiiskoi naychno-prakticheskoi konferentsii «Aktualnye voprosy Vserossiiskoi naychno-prakticheskoi konferentsii «Aktualnye voprosy razvitiia sovremennoi nauki, tekhniki u tekhnologii»*, 2011.
13. Elterman V. M. *Okhrana vozduшной sredy na khimicheskikh i neftekhimicheskikh predpriiatiakh*. Khimiia, 1985.
14. Taliev V. N. *Aerodinamika ventiliatsii: Ucheb.posobie dlia vuzov*. Stroizdat, 1979.
15. Berlyand M. E., Sidorenko G. I. *Manual on the control of atmospheric pollution*, Gidrometeoizdat, 1979.
16. *Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромет*. Гидрометеоздат, 1986.
17. *Atmosphere protection from industrial pollutions: ed. S. Kalvert and G. M. Inglund*, 1988.
18. Tkachenko T. M., Voloshkina O. S. "Rol «zelenykh konstruksii» u zmenshenni ekolohichnoho vidbytku urbotsenoziv." *5 Mizhnarodnii konhres "Zakhyst navkolyshnoho seredodyscha. Enerhooshchadnist. Zbalansovane prirodokorystuvannya"*: zbirnyk materialiv, 2018. – p. 31.



УДК 504.064.2

## Конвективная модель распространения эмиссии выбросов на автотранспортном путепроводе при нейтральных метеоусловиях

О. С. Волошкина<sup>1</sup>, В. В. Трофимович<sup>2</sup>, И. В. Климова<sup>3</sup>, Р. В. Сипаков<sup>4</sup>, Т. М. Ткаченко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [e.voloshki@gmail.com](mailto:e.voloshki@gmail.com),  
ORCID: 0000-0002-8398-0352

<sup>2</sup>к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [v.trofimovich@gmail.com](mailto:v.trofimovich@gmail.com)

<sup>3</sup>асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина

<sup>4</sup>к.т.н., докторант. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина,  
[tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID 0000-0003-2105-5951

*Аннотация. Анализ степени загрязнения атмосферного воздуха в городских районах определил её зависимость от растущего количества личных автотранспортных средств, работающих на традиционном топливе. В работе доказана возможность применения теории конвективной струи для оценки и прогноза загрязнения атмосферного воздуха мегаполисов в зависимости от метеоусловий и количества автомобилей, находящихся одновременно в «пробках» и «пробках» на автомобильном путепроводе. Для расчёта параметров конвективной струи используем интегральный метод Л. Эйлера. На основании рассмотренных основных путей распространения эмиссий в атмосфере, определены условия возникновения нейтрального состояния. Авторами представлена методика расчёта количества выбросов углеводородов от автомобильного транспорта, является основанием для определения вторичного загрязнения формальдегидом атмосферного воздуха территорий мегаполисов в результате фотохимических превращений. Представленные исследования позволяют выделить долю выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в разрезе общих выбросов мегаполиса. На основании данной модели разработан калькулятор расчёта концентраций загрязнения от автотранспорта. Калькулятор позволяет использовать специально синтезированные внешние воздействия с последующей обработкой результатов наблюдений и с последующим анализом последствий. Эффективность использования предложенной математической модели может быть увеличена в сочетании с применением «зеленых конструкций». Предложенный в работе подход пригодится при поиске оптимальных управленческих решений на муниципальном уровне и формирования экологической политики города.*

*Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, теория конвективной струи, математическая модель, выбросы углеводородов.*

UDC 504.064.2

## Convective Model of Emission Distribution on the Road Overpass Under Neutral Weather Conditions

O. S. Voloshkina<sup>1</sup>, V. V. Trofimovich<sup>2</sup>, I. V. Klimova<sup>3</sup>, R. W. Sipakov<sup>4</sup>, T. M. Tkachenko<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [e.voloshki@gmail.com](mailto:e.voloshki@gmail.com),  
ORCID: 0000-0002-8398-0352

<sup>2</sup>PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [v.trofimovich@gmail.com](mailto:v.trofimovich@gmail.com)

<sup>3</sup>Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>Ph.D., doctoral student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com),  
ORCID 0000-0003-2105-5951

*Abstract. An analysis of the degree of atmospheric air pollution in urban areas showed its dependence on a growing number of personal vehicles operating on traditional fuels. This work proves the possibility of applying the theory of a convective jet for estimating and forecasting atmospheric air pollution in megacities, depending on weather conditions and the number of cars that are simultaneously in traffic jams in a car overpass. We use the integral Euler method to calculate the parameters of a convective jet. The conditions for the appearance of neutral ways are determined and based on the considered main ways of distribution of emissions in the atmosphere. The method for calculating the amount of hydrocarbon emissions from road transport was used to determine the secondary pollution by formaldehyde of atmospheric air into the territories of megalopolises as a result of photochemical transformations. The presented studies allow to single out the share of greenhouse gas emissions from road transport in the context of total emissions in a megacity. A method for calculation of concentrations of pollution from motor vehicles based on this model has been developed. This method allows the use of specially synthesized external influences with the subsequent processing of the results of observations and subsequent analysis of the consequences. The effectiveness of the proposed mathematical model can be increased in combination with the use of "green structures". This method is suitable for finding optimal management decisions at the municipal level and the formation of the environmental policy of the city.*

*Keywords: air pollution, theory of convective jet, mathematical model, hydrocarbon emissions.*

Надійшла до редакції / Received 11.09.2018



## Корпорація «ТЕПЛОЕНЕРГО»



Корпорація «ТЕПЛОЕНЕРГО» вітчизняний виробник з більш ніж 20-літнім досвідом, що успішно працює на ринку України та Європи в галузі будівництва та модернізації систем тепло-і водопостачання, підготовки та очищення води, автоматизації та диспетчеризації житлових, адміністративних, промислових і громадських споруд, використовуючи сучасні досягнення світового рівня.

Висока якість продукції підтверджується неодноразовим вибором нашої компанії у якості підрядника при реалізації міжнародних енергозберігаючих проектів за кошти Світового банку, в тому числі серед інших провідних світових виробників аналогічного обладнання.

Наше обладнання за своїми характеристиками відповідає міжнародному рівню якості, що підтверджується сертифікатами якості ISO 9001, ISO 14001, наявністю технічних умов а також сертифікатів відповідності.

Основними перевагами нашого обладнання є:

- Висока якість і енергозбереження;
- Надійність в роботі і простота в обслуговуванні;
- Довговічність за рахунок застосування при виготовленні високоякісних комплектуючих світових брендів;
- Гарантія на все обладнання 2 роки і технічна підтримка.

### Наші замовники

Адміністрація Президента, Клуб Кабінету Міністрів, Міністерство Транспорту України;  
Заводи: «Фармак», «Оболонь», «Ятрань»;

Національний університет «Кієво-Могилянська академія», КПІ ім. Ігоря Сікорського;  
Готелі: «Опера», «Ялта», «Театральний»;

Будівельні компанії: УКРБУД, Stolitsa Group, Perfect Group, Київміськбуд, ДБК4,  
Ковальська, АРКАДА;



# Продукція корпорації «ТЕПЛОЕНЕРГО»

До корпорації складу входять компанії, які займаються :

- Виконанням проектних робіт по тепло- та водопостачанню, тепловим пунктам, котельням та каналізації
- Виробництвом:
  - Модульних блоків для систем опалення, гарячого водопостачання та вентиляції



- Теплообмінників . Наша компанія є одним з перших вітчизняних виробників розбірних пластинчатих **теплообмінників** на базі пластин провідних європейських виробників

- Насосних станцій підвищеного тиску та пожежогасіння
- Щитів автоматизації
- Фільтрів грубої очистки
- Продажем обладнання власного виробництва, а також обладнання закордонних партнерів.
- Монтажними та пусконаладжувальними роботами
- Гарантійним та сервісним обслуговуванням



Технічні потужності заводу дозволяють виготовляти до 30 модульних блоків та насосних станцій на місяць та до 80 теплообмінників, а наявність відповідних виробничих площ, універсального і спеціального устаткування, верстатів з ЧПУ, висококваліфікованих досвідчених фахівців дозволяє виконувати, в тому числі специфічні, фрезерні, токарні та свердлильні операції, зварювальні та слюсарно-складальні роботи, плазмове різання різних металів, порошкову і іншу покраску виробів

## Контакти

Адреса: Україна, 08113, Київська область, с.Петрушки, вул. Миру 25В

Тел.: +38 (050) 382-75-51 +38 (044) 290-44-22

e-mail: [sale@teploenergo.com.ua](mailto:sale@teploenergo.com.ua) [service1@teploenergo.com.ua](mailto:service1@teploenergo.com.ua)

Сайт : [www.teploenergo.com.ua](http://www.teploenergo.com.ua)

УДК 620.97:697.329

## Технології теплозабезпечення енергоефективних будинків із використанням геліоогороджень

С. П. Шаповал<sup>1</sup>, В. М. Желих<sup>2</sup>, М. Улевич<sup>3</sup>, В.Б.Шепітчак<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, [shapovalstepan@gmail.com](mailto:shapovalstepan@gmail.com),  
ORCID: 0000-0003-4985-0930

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, [v\\_zhelykh@msn.com](mailto:v_zhelykh@msn.com),  
ORCID: 0000-0002-5063-5077

<sup>3</sup>д.т.н., доц. Ченстоховська політехніка, Ченстохова, Польща, [ulewicz@bud.pcz.czest.pl](mailto:ulewicz@bud.pcz.czest.pl), ORCID: 0000-0001-8766-8393

<sup>4</sup>к.т.н., ст. викл., Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, [shepitchak@gmail.com](mailto:shepitchak@gmail.com)

*Анотація. Актуальним питанням сьогодення є принцип енергоощадності та раціонального використання енергоресурсів. Втручання в глобальні процеси природи не можливе без змін побуту в суспільстві. Зокрема, необхідне вдосконалення приміщень, у яких проживають люди, а саме їхніх будівельних конструкцій, фундаментів або матеріалів для виготовлення таких конструкцій. Удосконалення та розробка нових сонячних установок є важливою задачею підвищення енергоефективності будівель. У статті розглянуто питання геліоогороджень, таких як геліостіна, геліовікно та геліопокрівля. Наведено дані зміни температури теплоносія геліостіни та надходжень кількості питомої миттєвої теплової потужності в часі. Досліджено, що за інтенсивності сонячної енергії 900 Вт/м<sup>2</sup> температура на виході геліостіни становила 40 °С та поступово збільшувалась зі стабілізацією системи. Тоді, як геліоогородження із геліопокрівлею за інтенсивності теплового потоку  $I_e = 300 \text{ Вт/м}^2$  мало варіювання коефіцієнта корисної дії від 0,73 до 0,47 при зміні кутів падіння від 30° до 90°. У праці проаналізовано ефективність геліоогородження із геліовікном за умов південної орієнтації останнього відносно сторін горизонту. Встановлено, що запропоновані моделі геліоогороджень є достатньо ефективними і можуть використовуватись у системах сонячного теплопостачання.*

*Ключові слова: геліоогородження, геліостіна, геліопокрівля, геліовікно.*

**Вступ.** Актуальним питанням сьогодення є принцип енергоощадливості та раціонального використання енергоресурсів. Для України енергетична сфера є особливо важливою, оскільки саме вона в основному, впливає на стан національної економіки.

Реорганізація технологічної структури промислового та житлово-комунального секторів України з використанням науково-технічних розробок дозволить суттєво збалансувати стан споживання органічного виходного палива через збільшення частки споживання відновлюваних джерел енергії. Результатом такого раціонального поєднання буде зменшення антропогенного навантаження на довкілля та збереження обмежених у часі природних ресурсів.

Сонячні установки відрізняються конструктивними та техніко-економічними показниками. Важливим питанням сьогодення, крім вибору альтернативних джерел енергії, є удосконалення вже відомих сонячних установок та розробка нових геліоогороджень які будуть покращені у теплотехнічному співвідношенні.

**Актуальність дослідження.** Комфортне існування людини в сучасному світі неможливе без високого споживання енергії. У 60-их роках ХХ ст. населення споживало  $\approx 50\%$  того обсягу

енергії, що споживає населення в ХХІ ст. Це пов'язано насамперед з тим, що використання енергії стало фундаментом різноманітних процесів, а також енергія стала більш доступною для використання. Таке збільшення використання енергії є першопричиною сучасних глобальних проблем, серед яких дефіцит енергоносіїв та глобального потепління. Це обумовило особливе ставлення до відновлюваної енергетики, а саме вивід її з ряду перспективних ексклюзивних напрямків у ряд необхідних для застосування.

У середньому на одного мешканця планети Земля нараховується 2,5 т у. п. енергоресурсів. У перспективі до 2100 року населення Землі зросте до 10 млрд., а середні питомі енергоресурси – до 10 т у.п., тобто в цілому енерговидобування досягне 100 млрд т у.п. [1]. Рівень забруднення атмосфери теж невпинно зростатиме, що спричинятиме повільне руйнування біосфери. За даними групи американських інженерів, у 1800 році на 1 млн. молекул повітря припадало 280 молекул двоокису вуглецю, у 1960 році їх вже було 315, а на початку ХХІ століття – 370. До кінця цього століття це число може зрости до 550, що спричинить середнє підвищення температури від 3 до 6°C [2].

За даними Carrington College у світі можливий розвиток Енергетичної революції. Так,

порівняння базового сценарію споживання первинної енергії та сценарію з упровадженням відновлюваних джерел до 2050 року показує, що світ може скоротити використання невідновлюваних джерел енергії практично в 1,5 рази [3].

**Останні дослідження та публікації.** Найбільш потужним відновлюваним джерелом енергії для людства є Сонце. Щорічна кількість сонячної енергії майже в 15 000 разів перевищує потреби населення нашої планети, але лише невелика його частина використовується для економічних потреб. Американський науковець Джон Рікардо Коул узагальнено стверджує, що світ стоїть на порозі «Ери сонячної енергетики» [4].

Клімат України дає можливість широкого використання сонячної енергії. Відомі різні конструкції геліоустановок, що містять захисне покриття, теплоізоляційний шар та розташований між ними теплопровідний шар [5, 6].

Плоский колектор – найпоширеніший вид сонячних колекторів, у якому скорочені втрати теплоти з боків та задньої поверхні. Плоскі колектори використовуються в низькотемпературних процесах до 80 °С. Для вищої температури необхідні системи з концентраторами [7]. Для впровадження сонячних теплових установок слід оптимізувати енергоефективні зовнішні огороження шляхом правильного встановлення та проектування цих установок при різних орієнтаціях зовнішніх огорожень [8].

**Формулювання цілей статті.** Мета роботи запропонувати економічно вигідні та ефективні конструкції геліоогорожень без втрати ефективності існуючих систем, а також, дослідити запропоновані конструкції геліоогорожень та визначити їхні теплові характеристики.

**Основна частина.** У дослідженнях використані запропоновані дослідні установки геліоогорожень, а саме геліостіни, геліопокрівлі та геліовікна, у системах сонячного теплопостачання, з подальшим аналізом їхнього коефіцієнта корисної дії. Конструкція геліостіни є універсальним рішенням економії невідновлюваних енергоресурсів та коштів споживача, оскільки це поєднання зовнішнього огороження та сонячного колектора.

Експериментальна установка [9] геліостіни (рис. 1) має такі конструктивні розміри: діаметр трубок  $d = 5$  мм, відстань між трубками  $\ell = 50$  мм, товщина теплопоглинач над трубками  $\delta = 10$  мм, об'єм  $V = 15$  л. Система сонячного теплопостачання геліоогороження у формі геліостіни працює в режимі гравітації.

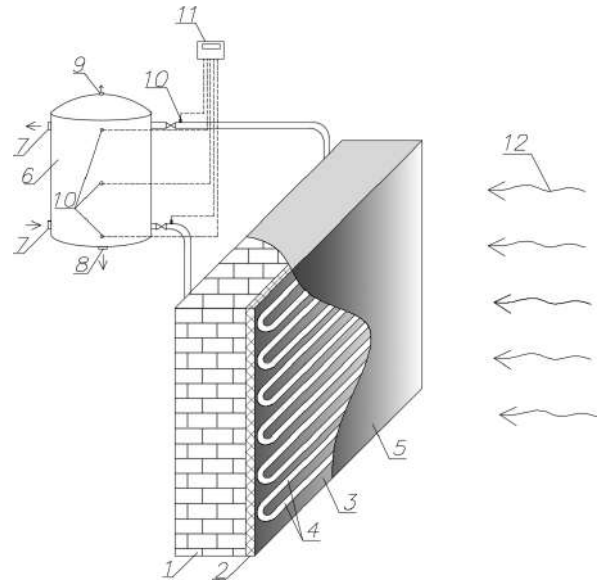


Рис. 1. Схема експериментальної установки:  
 1 – геліостіна; 2 – теплоізоляційний шар;  
 3 – тепловідбивний шар; 4 – трубки контуру циркуляції;  
 5 – тиньк; 6 – бак-акумулятор; 7 – патрубки відбору та надходження теплоносія; 8 – патрубок сливу теплоносія;  
 9 – повітровипускний клапан; 10 – термометри;  
 11 – дисплей; 12 – джерело випромінювання

Вода з бака-акумулятора 6 поступає до трубок контуру циркуляції 4, у яких нагрівається за принципом природної конвекції за допомогою випромінювання 12, та повертається до бака-акумулятора 6. Відбір теплоносія виконується патрубком 7.

Математична обробка результатів вимірювання фізичних властивостей виконується за розробленими спеціальними програмами. Інтенсивність потоку енергії, яку випромінює джерело, виміряне актинометром.

Температура теплоносія на вході й виході у сонячний колектор та в баці-акумуляторі виміряні термоперетворювачами опору 50 М, що працюють з регулятором-вимірювачем типу РТ-0102. Температура навколишнього повітря та його швидкість вимірювалася термоелектроанемометром TESTO 405- V1.

Коефіцієнт корисної дії системи сонячного теплопостачання геліостіни  $\eta_{сст}$  в цілому визначено за кількістю енергії, отриманої баком-акумулятором:

$$\eta_{сст} = \frac{Q_{отп}}{Q_{пром}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $Q_{отп}$  – кількість теплоти, Вт, що отримав бак-акумулятор за час  $\Delta t$ , с (визначалась експериментально);  $Q_{пром}$  – кількість променевої теплоти, Вт, що надійшла на поверхню геліостіни за той самий проміжок часу  $\Delta t$ , с.

Температура теплоносія змінювалася протя-

гом експериментів залежно від факторів, що впливали на неї. Так наприклад, за інтенсивності сонячної енергії  $I = 900 \text{ Вт/м}^2$  температура на виході геліостіни становила  $40^\circ\text{C}$  та поступово збільшувалась зі стабілізацією системи (рис. 2).

Усереднена температура бака, наприклад, за інтенсивності  $I = 300 \text{ Вт/м}^2$  в баку-акумуляторі досягала  $13,3^\circ\text{C}$  (рис. 3) при 120 хвилинах опромінення. Миттєві значення питомої теплової потужності для системи сонячного теплопостачання, (рис. 4) набувають параболічної форми, що може бути пов'язано зі стабілізацією системи в часі.

Коефіцієнт корисної дії експериментальної комбінованої системи сонячного теплопостачання  $\eta_{\text{СТ}}$  (рис. 5) за інтенсивності випромінювання  $I = 300 \text{ Вт/м}^2$  та кута падіння сонячних променів  $\beta = 30^\circ$  відносно площини геліостіни

досягав 17 % за швидкості повітряного потоку  $v = 5 \text{ м/с}$  при напрямку повітряного потоку  $\alpha = 70^\circ$  відносно площини колектора. За результатами експериментальних досліджень геліопокрівлі побудовано графік залежності (рис. 6) коефіцієнта ефективності геліосистеми  $K_{\text{еф}}$  від азимутального кута повороту геліопокрівлі  $\alpha, ^\circ$ , і кута повороту геліопокрівлі  $\beta, ^\circ$ . Коефіцієнт  $K_{\text{еф}}$  є відношенням кількості теплоти за різних конструктивних розмірів, до кількості теплоти за базових конструктивних розмірів ( $d = 15 \text{ мм}$ ,  $\ell = 150 \text{ мм}$ ,  $\delta = 10 \text{ мм}$ , об'єм  $V = 15 \text{ л}$ ). Коефіцієнт ефективності  $K_{\text{еф}}$  за інтенсивності теплового потоку  $I_e = 300 \text{ Вт/м}^2$ , змінюється від 0,73 до 0,47 при зміні кутів падіння від  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . Це вказує на можливість широкого застосування експериментальної геліопокрівлі для енергоефективних будівель та її ефективної роботи впродовж дня.

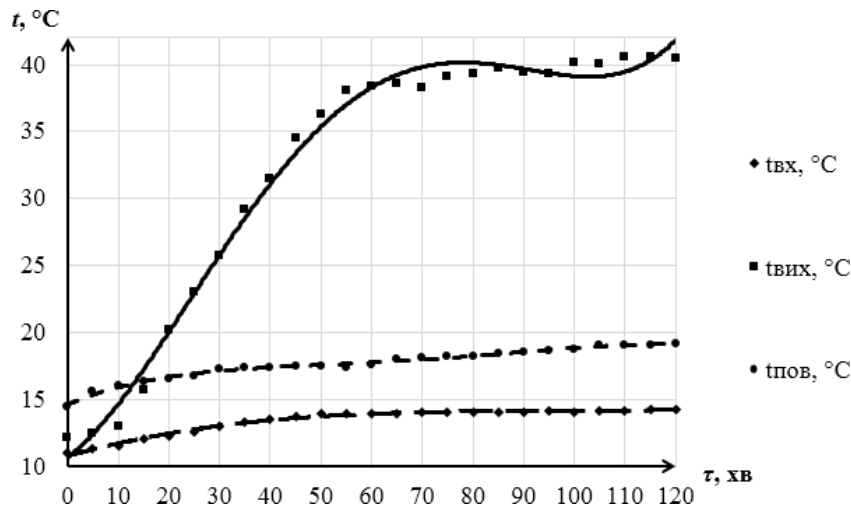


Рис. 2. Температура теплоносія в системі сонячного теплопостачання та температура навколишнього повітря впродовж експерименту в режимі гравітації при інтенсивності сонячної енергії  $I = 900 \text{ Вт/м}^2$ , де  $t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$  – температура на вході в геліостіну;  $t_{\text{вих}}, ^\circ\text{C}$  – температура на виході з геліостіни;  $t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$  – температура оточуючого середовища

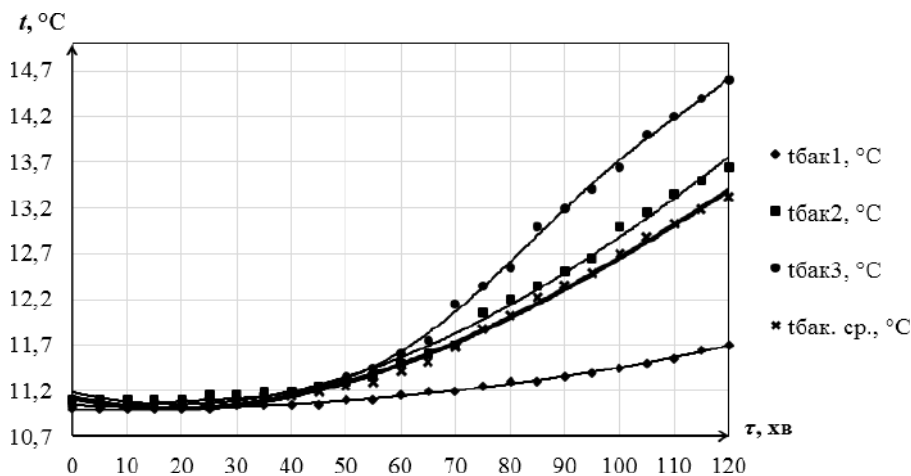


Рис. 3. Температура теплоносія в системі сонячного теплопостачання та температура навколишнього повітря впродовж експерименту в режимі гравітації при інтенсивності опромінення  $I = 300 \text{ Вт/м}^2$ :  $t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$  – температура на вході в геліостіну;  $t_{\text{вих}}, ^\circ\text{C}$  – температура на виході з геліостіни;  $t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$  – температура навколишнього повітря

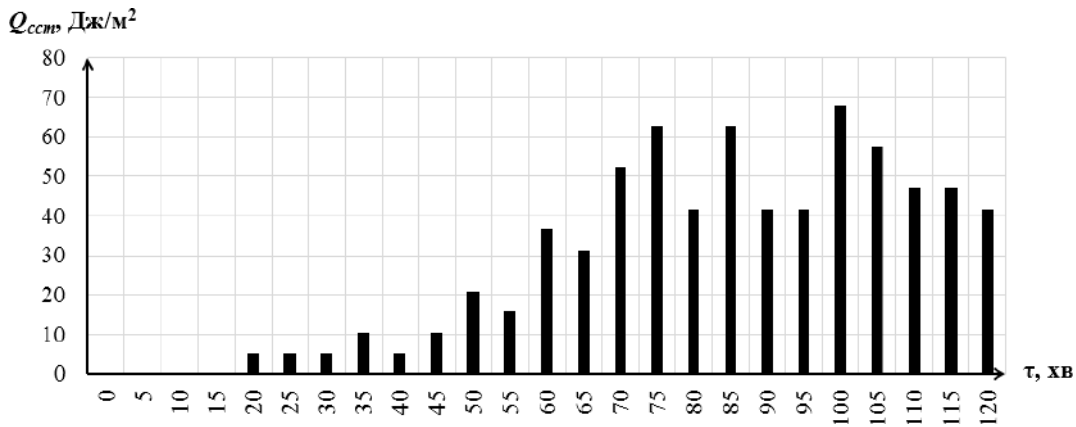


Рис. 4. Питома миттєва теплова потужність системи сонячного теплопостачання із геліостіною  $Q_{sst}$ , Дж/м<sup>2</sup> у режимі гравітації при  $I = 900$  Вт/м<sup>2</sup>

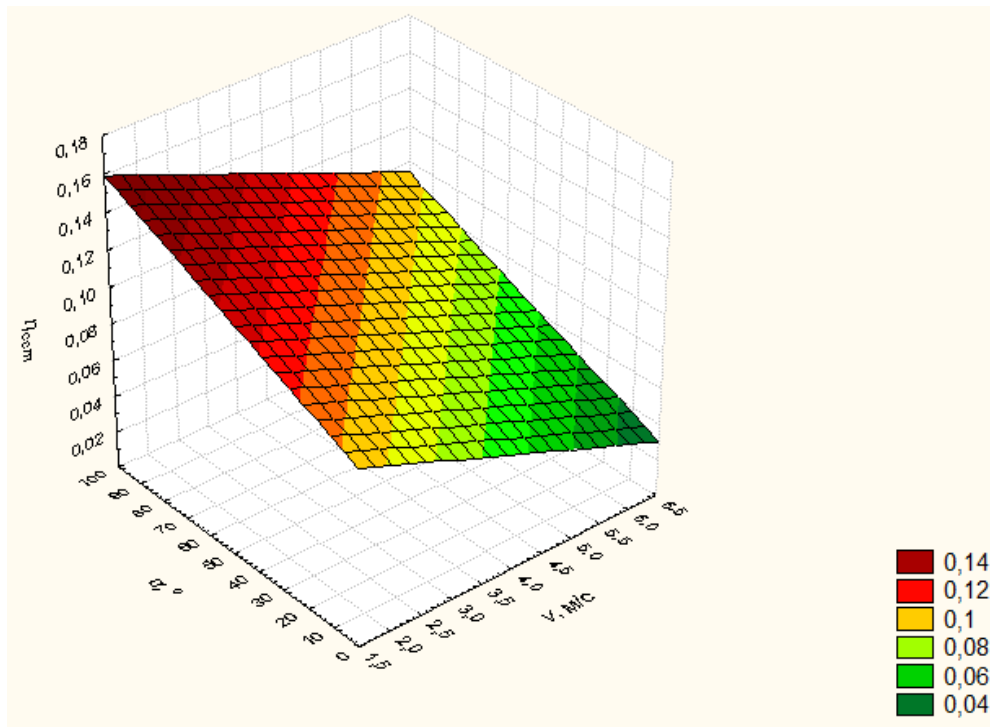


Рис. 5. Варіювання коефіцієнта корисної дії системи сонячного теплопостачання із геліостіною в цілому  $\eta_{sst}$  залежно від напрямку повітряного потоку  $\alpha$ , ° та швидкості повітряного потоку  $v$ , м/с в режимі гравітації при сталих значеннях  $I = 300$  Вт/м<sup>2</sup> та  $b = 30^\circ$

Ефективність комбінованої експериментальної системи теплопостачання геліоогородження із геліовікном (рис. 7) у літній період за південної орієнтації має тенденцію до зростання в часі та досягає свого максимуму у вечірній час. Це пов'язано із акумуляцією теплоти площиною сонячного колектора від зовнішнього середовища, оскільки коливання температури протягом експерименту мали незначний характер.

**Висновки.** Запропоновані системи сонячного теплопостачання з геліоогородженнями є доступними для споживача в економічному аспекті та мають достатній коефіцієнт корисної дії для суміщеного гарячого водопостачання чи

попереднього нагріву теплоносія системи опалення. При малих кутах надходження теплового потоку, які знаходились у межах  $0...90^\circ$  та низької інтенсивності випромінювання в межах  $100 \dots 900$  Вт/м<sup>2</sup> коефіцієнт корисної дії досягав 70 % для геліостіни. В експериментальних дослідженнях комбінована система теплопостачання геліопокрівлі досягла ККД 70 %, як і геліостіна, у той час, як геліоогородження із геліовікном досягало ККД 75 %. Це дає змогу підтвердити можливість широкого використання сонячних колекторів, суміщених із конструкцією будівлі, у системах сонячного теплопостачання при різних кутах падіння теплового потоку.

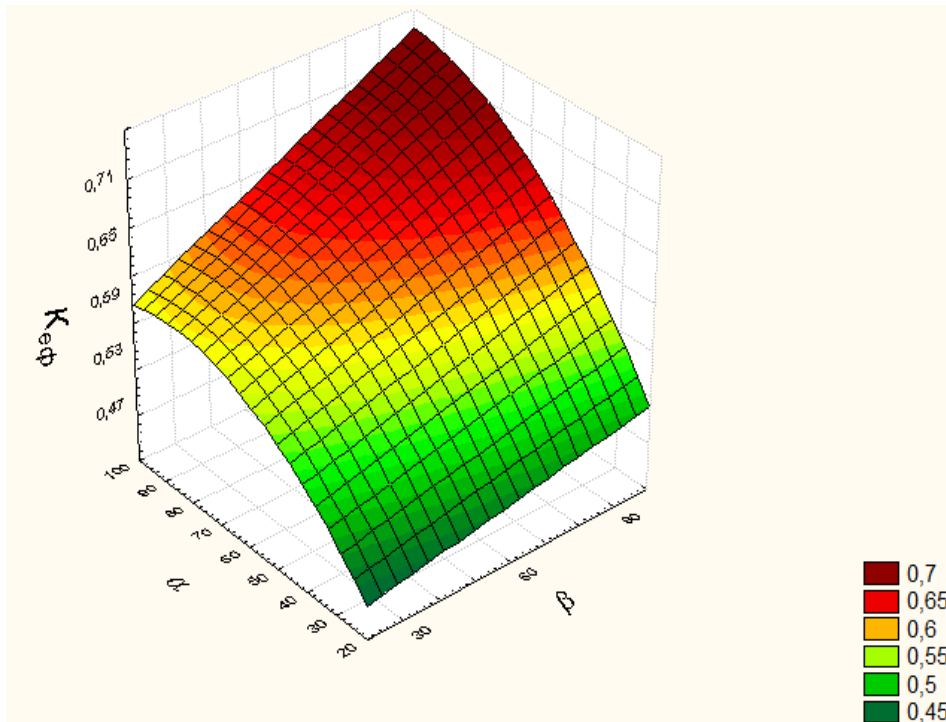


Рис. 6. Залежність коефіцієнта ефективності геліопокрівлі  $K_{\text{eff}}$  від кутів падіння теплового потоку  $\alpha^\circ$  та  $\beta^\circ$

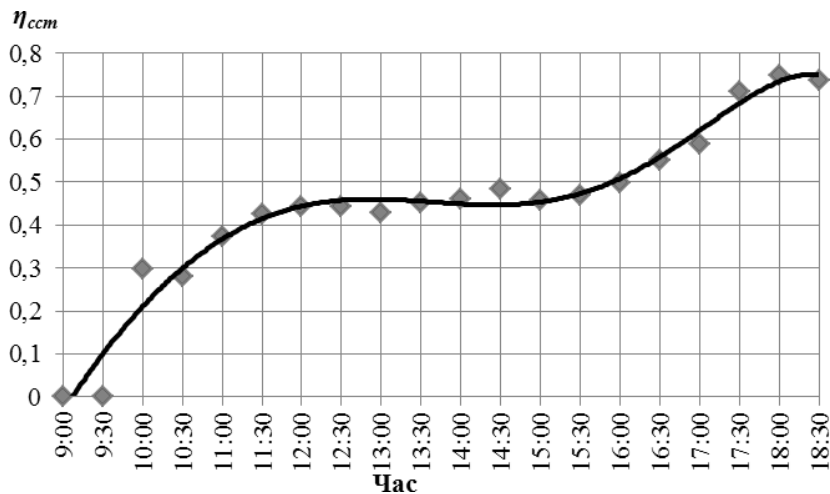


Рис. 7. Ефективність гравітаційної системи сонячного теплопостачання геліозахищення із геліовікном за умов південної орієнтації

**Перспективи подальших досліджень.** У подальших дослідженнях буде розроблено комплексні методології розрахунку вище описаних геліоогорожень для спрощення розрахунків в перед проектних роботах енергоефектив-

них будівель. Крім цього, виконати обґрунтування та можливість інтеграції вище описаних геліоогорожень у вже існуючі конструкції будинків з метою збереження традиційних енергетичних ресурсів в Україні.

### Література

1. Шидловський А. К. Енергетичні ресурси України: навч. посіб. / А. К. Шидловський, С. І. Випанасенко, О. Б. Іванов. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 178 с.
2. Шведа Е. Trading wind and sun / Шведа Е. // Зелена енергетика. – 2009. – №3. – С. 5-6.
3. Renewable Energy [Електронний ресурс] // Carrington College – Режим доступу до ресурсу: <http://visual.ly/renewable-energy>.
4. Світ стоїть на порозі «ери сонячної енергетики» [Електронний ресурс] // SmartEco. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://smarteco.biz.ua>.
5. Solar cell panel and solar energy collecting device: Пат. 6513518 США. / Stéphane Girerd; Greer, Burns & Crain, Ltd. – N 09/674030; Опубл. 02.04.2003.



6. Solar energy absorbing roof : Пат. 4201193 США. /Michel Ronc; Bacon & Thomas. – N 05/887,938; Опубл. 6.05.1980.
7. Використання сонячної теплової енергії в промисловості / К.Брюнер, Ю. Бухмайер, Ю. Флюш, Б. Мюстер-Славич. – Київ: Гляйсдорф, 2015. – 80 с.
8. Желих В. М. Потенціал променистої енергії в Україні та її використання для низькотемпературних сонячних колекторів / В. М. Желих, С. П. Шаповал, І. І. Венгрин. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 80 с.
9. Сонячна енергетика: теорія та практика. / Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О. С. Дацько, С. П. Шаповал. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 340 с.

#### References

1. Shydlovskiy A. K., Vypanasenko S. I., Ivanov O. B. *Enerhetychni resursy Ukrainy*. Natsionalnyi hirnychy universytet, 2003.
2. Shveda E. "Trading wind and sun." *Green energy*, no. 3, 2009.
3. "Renewable Energy" [Electronic resource]. *Carrington College* – Access to resources: <http://visual.ly/renewable-energy>.
4. Svit stoit na porozі «ery soniachnoi enerhetyky» [Electronic resource] // SmartEco, 2016, <https://smarteco.biz.ua>.
5. Solar cell panel and solar energy collecting device: Pat. 6513518 USA. / Stéphane Girerd; Greer, Burns & Crain, Ltd. – N 09/674030; Pubwished 02.04.2003.
6. Solar energy absorbing roof: Pat. 4201193 США. /Michel Ronc; Bacon & Thomas. – N 05/887,938; Pubwished 6.05.1980.
7. Briuner K., Bukhmaier Yu., Fliush Yu., Miuster-Slavych B. *Vykorystannia soniachnoi teplovoi enerhii v promyslovosti*. Hliaisdorf, 2015.
8. Zhelykh V. M., Shapoval S. P., Venhryn I. I. *Potentsial promenytoyi enerhii v Ukraini ta ii vykorystannia dlia nyzkotemperaturnykh soniachnykh kolektoriv*. Lvivska politekhnika, 2014.
9. Mysak J. S., Vozniak O. T., Datsko O. S., Sapoval S. P. *Sonichna enerhetuka: teopія ta praktyka*. Lvivska politekhnika, 2014.

УДК 620.97:697.329

## Технологии теплообеспечения энергоэффективных домов с использованием гелиоограждений

С. П. Шаповал<sup>1</sup>, В. М. Желих<sup>2</sup>, М. Ulewicz<sup>3</sup>, В. Б. Шепитчак<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, [shapovalstepan@gmail.com](mailto:shapovalstepan@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4985-0930

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, [v\\_zhelykh@msn.com](mailto:v_zhelykh@msn.com), ORCID: 0000-0002-5063-5077

<sup>3</sup>д.т.н., доц. Ченстоховская политехника, Ченстохова, Польша, [ulewicz@bud.pcz.czest.pl](mailto:ulewicz@bud.pcz.czest.pl), ORCID: 0000-0001-8766-8393

<sup>4</sup>к.т.н., ст. преп. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, [shepitchak@gmail.com](mailto:shepitchak@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5883-548X

*Аннотация. Актуальным вопросом на сегодня является принцип энергосбережения и рационального использования энергоресурсов. Вмешательство в глобальные процессы природы невозможно без изменений быта в обществе. В частности, необходимо совершенствование помещений в которых проживают люди, а именно строительных конструкций, фундаментов или материалов для изготовления таких конструкций. Совершенствование и разработка новых солнечных установок является важной задачей повышения энергоэффективности зданий. В статье рассмотрены вопросы гелиоограждений, таких как гелиостена, гелиоокно и гелиокровля. Приведены данные изменения температуры теплоносителя гелиостены и поступлений количества удельной мгновенной тепловой мощности во времени. Показано, что при интенсивности солнечной энергии 900 Вт/м<sup>2</sup> температура на выходе гелиостены составляла 40 °С и постепенно увеличивалась со стабилизацией системы. При этом гелиоограждения с гелиокровлей при интенсивности теплового потока  $I_e = 300 \text{ Вт/м}^2$  имело варьирование коэффициента полезного действия от 0,73 до 0,47 при изменении углов падения от 30° до 90°. В работе проанализирована эффективность гелиоограждения с гелиоокном в условиях южной ориентации последнего относительно сторон горизонта. Установлено, что предложенные модели гелиоограждений являются достаточно эффективными и могут использоваться в системах солнечного теплоснабжения.*

*Ключевые слова: гелиоограждения, гелиостена, гелиокровля, гелиоокно.*

UDC 620.97:697.329

## Technologies of heat provision in energy efficient houses using solar fences

S. Shapoval<sup>1</sup>, V. Zhelykh<sup>2</sup>, M. Ulewicz<sup>3</sup>, V. Shepichak<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph. D., Associate Professor. National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine, shapovalstepan@gmail.com,

ORCID: 0000-0003-4985-0930

Sc.D., Professor. National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine, v\_zhelykh@msn.com, ORCID: 0000-0002-5063-5077

<sup>3</sup>Sc.D., Associate Professor. Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland, ulewicz@bud.pcz.czest.pl,

ORCID: 0000-0001-8766-8393

<sup>4</sup>Ph. D., Senior Lecturer. National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine, shepichak@gmail.com,

ORCID: 0000-0001-5883-548X

*Abstract. A topical issue at the time, when the cost of traditional energy sources is growing, is using alternative or non-traditional energy sources, such as solar, wind, geothermal, hydropower, bioenergy etc. The most powerful source of energy for humanity is the Sun. The annual amount of solar energy is almost 15 000 times higher than the needs of the population of our planet, but only a small part of it is used for economic needs. The climate of Ukraine gives a potential opportunity of wide use of solar energy. Intervention in the global processes of nature is not possible without changes in every day life in society. In particular, the improvement of the premises, in which people live is necessary, namely their building structures, foundations and materials for the manufacture of such structures. The article deals with the issue of solar fences, such as solar wall, solar window and solar roof. In the article is described the data of changes in the temperature of the heat carrier of the solar wall, the amount of specific instantaneous thermal power in time. It was investigated that at the solar energy intensity of 900 W/m<sup>2</sup> the temperature at the outlet of the solar wall was 40 °C and gradually increased with the stabilization of the system. Whereas, solar fences with a solar roof on intensity of a heat flux  $I_0 = 300 \text{ W/m}^2$  there is little variation of efficiency from 0,73 to 0,47 at change of angles of falling from 30° to 90°. The paper analyzes the efficiency of solar fencing with a solar window in the southern orientation of it. It is established that the proposed models of solar fences are quite effective and can be used in solar heat supply systems.*

*Keywords: solar fence, solar wall, solar roof, solar window.*

Надійшла до редакції / Received 15.09.2018

УДК 532.516:536

## Математическая модель и метод расчёта динамики сушки биомассы при производстве пеллет

Н. Н. Сорокова<sup>1</sup>, Д. Н. Коринчук<sup>2</sup>, Ю. Н. Кольчик<sup>3</sup>, Р. А. Шапарь<sup>4</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, [n.sorokova@ukr.net](mailto:n.sorokova@ukr.net), ORCID: 0000-0002-3529-7145

<sup>2</sup>к.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, [ntps@i.ua](mailto:ntps@i.ua), ORCID: 0000-0001-7752-4345

<sup>3</sup>к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина, [yulia@orbblink.kiev.ua](mailto:yulia@orbblink.kiev.ua), ORCID: 0000-0003-4559-5725

<sup>4</sup>к.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, [r.sh@ukr.net](mailto:r.sh@ukr.net), ORCID: 0000-0001-6448-8760

*Аннотация. Пеллеты являются одним из перспективных источников энергии. При их производстве необходима правильная организация процесса сушки сырья. Температура процесса не должна достигать верхнего критического предела – 270 °С – при котором происходит термодеструкция, приводящая к потере горючей составляющей сырья. Для этого разработана математическая модель и численный метод расчёта динамики теплопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел цилиндрической формы в условиях равномерного обдува теплоносителем. Математическая модель строилась на базе дифференциального уравнения переноса субстанции (энергии, массы, импульса) в деформируемых системах. Проведены экспериментальные исследования кинетики обезвоживания частиц энергетической вербы в потоке воздуха с целью верификации математической модели. Сопоставление результатов численных и физических экспериментов свидетельствуют об адекватности математической модели и эффективности метода её реализации. На их основе возможно проводить исследование динамики теплопереноса при сушке частиц различных видов измельчённой биомассы; определять время достижения равновесного влагосодержания в зависимости от свойств материала и сушильного агента. На основе этих данных возможно выбирать оптимальные с точки зрения сохранения энергии и качества высушиваемого продукта режимные параметры процесса.*

*Ключевые слова: биомасса, сушка, математическое моделирование, цилиндрическая частица, барабанная сушилка*

**Вступление.** В условиях постоянно растущих цен на традиционные энергоносители, которые используются в системах теплоснабжения, всё более широкое применение находят альтернативные источники энергии. Котлы, работающие на пеллетах, считаются сравнительно новым видом отопительных систем. Они имеют КПД около 85...90 процентов, затраты на их приобретение и установку окупаются в кратчайшие сроки. Производители также предлагают модели, оснащённые дополнительным контуром горячего водоснабжения.

Пеллеты относятся к биотопливу с высокими теплотворными характеристиками и имеют относительно невысокую цену. Благодаря прессованной структуре они удобны в транспортировке и хранении. После сгорания зольный остаток составляет всего половину процента от объёма топлива, и его можно использовать в качестве удобрения. Использование биомассы растительного (в т. ч. древесного) происхождения в качестве сырья для получения топливных брикетов и гранул в последние годы становится все более популярным направлением возобновляемой энергетики в мире.

Для производства пеллет сырьё должно иметь влажность 8...12 %. В большинстве видов биомассы (солома, стебли кукурузы, подсолнечника, древесная стружка, энергетическая

верба, сорго, мискантус) исходное содержание влаги по отношению к общей массе составляет 50...60%. Правильная организация процесса сушки исходного сырья в наибольшей степени определяет качество топливных пеллет.

Сушка биомассы осуществляется преимущественно в барабанных сушильных установках после её предварительного измельчения. В зависимости от температуры  $T_c$ , °С, теплоносителя, сушка может быть умеренно интенсивной ( $T_c = 120...170$  °С) и высокотемпературной ( $T_c = 300...500$  °С). По достижении частицами биомассы температуры 150 °С начинается термическое разложение наименее устойчивых составляющих биомассы с выделением кислородсодержащих газов, что повышает калорийность остатка и, соответственно, биотоплива в целом. Однако нагрев частиц биомассы до температуры 270 °С и выше отрицательно сказывается на качестве сырья. Это обусловлено интенсивным прохождением экзотермических процессов последующих стадий термодеструкции, приводящих к потере горючей составляющей сырья.

Следовательно, важным моментом в разработке технологии сушки биомассы является условие достижения частицами температуры разложения, но не превышение критической температуры.

**Формулировка проблемы и анализ последних достижений.** Создание сушильных технологий требует детального изучения явлений тепломассопереноса и фазовых превращений в высушиваемом материале. Экспериментальное исследование кинетики сушки частиц биотоплива малого размера в условиях достаточно высокой температуры связано с существенными трудностями. Перспективным методом исследования является математическое моделирование динамики сушки одиночной пористой частицы в потоке сушильного агента.

В [1] была построена математическая модель и метод расчета динамики диффузионной сушки капиллярно-пористых тел в форме ограниченного цилиндра. Частицы всех видов биомассы представляют собой коллоидные капиллярно-пористые тела. В работе на базе дифференциального уравнения переноса субстанции [2] построена математическая модель динамики тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел. Сушка в высокотемпературном сушильном агенте предполагает прохождение процессов переноса вследствие диффузии, фильтрации и фазовых превращений. Обычно барабанные сушильные аппараты оснащены лопаточными устройствами, которые способствуют интенсивному перемешиванию сырья и равномерному обдуву теплоносителем каждой частицы. Форма измельченных частиц биомассы имеет вид полых или сплошных цилиндров конечной длины. Данные положения легли в основу разработки математической модели динамики сушки частиц биомассы.

**Основная часть.** Математическая модель тепло- и массопереноса при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых частиц в форме конечного цилиндра представляется в следующем виде :

$$c_{эф} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + w_{эф,r} \frac{\partial T}{\partial r} + w_{эф,y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - LI_V \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_{жс}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{жс,r} U_{жс})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{жс,y} U_{жс})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{жс} r \frac{\partial U_{жс}}{\partial r} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{жс} \frac{\partial U_{жс}}{\partial y} \right) - I_V - \frac{U_{жс}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_n}{\partial t} + \frac{\partial (w_{z,r} U_n)}{\partial r} + \frac{\partial (w_{z,y} U_n)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_n r \frac{\partial U_n}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_n \frac{\partial U_n}{\partial y} \right) + I_V - \frac{U_n}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_е}{\partial t} + \frac{\partial (w_{z,r} U_е)}{\partial r} + \frac{\partial (w_{z,y} U_е)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_е r \frac{\partial U_е}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_е \frac{\partial U_е}{\partial y} \right) - \frac{U_е}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь  $T$  – температура;  $U_{жс}$ ,  $U_n$ ,  $U_е$  – объемные концентрации жидкой, паровой и воздушной фаз, содержащихся в порах биомассы;  $t$  – время;  $c_{эф}$ ,  $\lambda_{эф}$  – эффективные значения теплоемкости и теплопроводности тела, определяемые выражениями

$$c_{эф} = c_m U_m + c_{жс} U_{жс} + c_n U_n + c_е U_е,$$

$$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_m U_m}{\rho_m} + \frac{\lambda_{жс} U_{жс}}{\rho_{жс}} + \frac{\lambda_n U_n}{\rho_n} + \frac{\lambda_е U_е}{\rho_е};$$

$D_{жс}$ ,  $D_n$ ,  $D_е$  – эффективные коэффициенты диффузии компонентов;  $A_D$  – энергия активации;  $I_V$  – интенсивность испарения жидкости в теле;  $L$  – удельная теплота испарения;  $\varepsilon_V$  – относительная объемная деформация;  $w_{эф,k}$  – эффективная скорость связанного вещества,

$$w_{эф,k} = \frac{w_{жс,k} c_{жс} U_{жс} + w_{z,k} (c_n U_n + c_е U_е)}{c_{эф}},$$

в направлении  $k$  ( $k = r, y$ ).

Для нахождения коэффициента диффузии жидкости применялась формула, полученная Н. И. Никитенко [3]

$$D_{8,ж} = \gamma_D [\exp(A_D/RT) - 1]^{-1}, \quad (5)$$

а для коэффициентов диффузии пара и воздуха – известная формула [6]  $D_n = D_a = \gamma_n T^{3/2}/P_z$ .

Скорости фильтрации  $w_\psi$  жидкой и газовой фаз ( $\psi = ж, г$ ) находятся по закону Дарси:  $w_\psi = -K_0 K_\psi / \eta_\psi \nabla P_\psi$ , где  $K_0$  – общая проницаемость среды;  $K_\psi$  – относительная проницаемость фазы  $\psi$ ;  $\eta_\psi$  – динамический коэффициент вязкости фазы  $\psi$ ,  $P_\psi$  – парциальное давление фазы  $\psi$ . Для нахождения  $P_{ж}$  и  $P_z$  необходимо располагать функциями  $U_{ж}, U_n, U_g$  и  $T$ . При этом определяются объёмные доли скелета  $\psi_m$ , жидкости  $\psi_p$  и газа  $\psi_z$  в пористых гранулах:  $\psi_m = 1 - \Pi$ ,  $\psi_{жс} = U_{ж}/\rho_{ж}$  и  $\psi_z = 1 - \psi_m - \psi_{жс}$ , где  $\Pi$  – пористость,  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости; рассчитывается парциальная плотность пара и воздуха  $\rho_n = U_n / \psi_z$ ,  $\rho_g = U_g / \psi_z$ , а затем парциальные давления  $P_n = \rho_n R_y T / \mu_n$  и  $P_g = \rho_g R_y T / \mu_g$ . Давление газовой смеси представляется суммой  $P_z = P_n + P_g$ , а давление жидкой фазы равно  $P_{жс} = P_z + P_k$ . Капиллярное давление  $P_k$  находится как среднее капиллярное давление жидкости [2]:

$$P_k = \int_{r_{min}}^{r_{max}} P_{кЛ} dV \int_{r_{min}}^{r_{max}} dV \dots$$

Объём жидкости в капиллярах с радиусами от  $r$  до  $r + dr$  в единичном объёме тела пропорционален дифференциальной функции  $F(r)$  распределения пор по размерам  $dV(r) = \theta(r) F(r) dr$ , где  $\theta(r)$  – объёмная доля капилляра, занятая жидкостью. В результате получаем выражение, аналогичное формуле Лапласа

$$P_k = 2\sigma(T) \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \theta(r) F(r) dr} = \frac{2\sigma(T)}{r^*},$$

где  $r^*$  – характеристический параметр размеров пор,  $r_{min} < r^* < r_{max}$ ;  $r_{min}$  и  $r_{max}$  – минимальный и максимальный радиусы пор единичного объема.

Интенсивность испарения жидкости на наружных поверхностях частиц биомассы [4, 5] находится как разность потоков испаряющейся жидкости и конденсирующегося пара

$$I = \gamma_c \left\{ \phi_m|_{v=0} \left( \exp[A/(RT)|_{v=0}] - 1 \right)^{-1} \right\} -$$

$$- \left( \phi_c \left( \exp[A/(RT_c)] - 1 \right)^{-1} \right). \quad (6)$$

Здесь  $\gamma_c$  – коэффициент поверхностного испарения,  $\gamma_c = \varepsilon \rho_{ж} \delta^* / 4$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $1/c$ ;  $\delta^*$  – средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы в слое жидкости;  $\phi_r$  – влажность парогазовой смеси, которая соответствует согласно изотерме сорбции концентрации  $U_{ж}$  в данной точке тела;  $\nu$  – нормаль к поверхности;  $T_c$  и  $\phi_c$  – температура и относительная влажность внешней среды;  $A$  – энергия активации.

Выражение для удельной интенсивности испарения в объёме тела следует из формулы (6) при условии локального термодинамического равновесия фаз

$$I_V = \gamma_c [\exp(A/RT) - 1]^{-1} (\phi_m - \phi) S, \quad (7)$$

где  $S$  – площадь контакта жидкой и газовой фаз в порах тела не полностью заполненных жидкостью.

Функция  $S$  в единичном объёме тела определялась по формуле, полученной в [5]:

$$S = \frac{2\sqrt{1-\phi_m}}{\rho_{жс} \delta^*} \frac{\partial U_{жс}}{\partial \phi_m}. \quad (8)$$

Производная  $\partial U_{жс}/\partial \phi_r$  находится из уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде  $U_{жс} = U_{max} \phi_m^g$ ,  $g = \text{const}$ , то  $\partial U_{жс}/\partial \phi_r = U_{max} g \phi_r^{g-1}$ . Данные по равновесному влагосодержанию для древесины представлены в [6] довольно точно аппроксимируются уравнением  $W^{-1} = W_{max}^{-1} - 0,12 \ln \phi$ , где максимальное влагосодержание  $W_{max}$  соответствует относительной влажности воздуха  $\phi = 1$  и при температуре  $100^\circ\text{C}$  составляет 16%, а  $U_{жс} = 0,01 W \rho_r$ .

Относительная объёмная деформация  $\varepsilon_V$  находится с помощью аналитического решения осесимметричной задачи о напряженном состоянии полого цилиндра, полученного в [7] при условии, что деформации происходят вследствие неоднородности полей температуры и концентрации компонентов связанного вещества, а также под влиянием равномерно распределенных давлений:  $P_0$  на внутренней цилиндрической поверхности радиуса  $r = r_0$ ,  $P$  на внешней поверхности радиуса  $r = R$  и результирующей силы  $P_y$  вдоль оси цилиндра

у:

$$u_r(r) = \frac{1}{r(1-\nu_{II})} \left[ (1+\nu_{II}) \int_{r_0}^r N r dr + \frac{r^2(1-3\nu_{II}) + r_0^2(1+\nu_{II})}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R N r dr + \frac{r\nu_{II} P_y}{E_y \pi (R^2 - r_0^2)} \right] + \frac{1}{E_y r (R^2 - r_0^2)} [r^2(1-\nu_{II})(P_0 r_0^2 - PR^2) + (1+\nu_{II})r_0^2 R^2 (P_0 - P)]; \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R N r dr - \frac{2\nu_{II} P_0 r_0^2 - PR^2}{E_y} - \frac{P_y}{E_y \pi (R^2 - r_0^2)}, \quad (10)$$

где  $u_r, \varepsilon_y$  – проекции вектора перемещения на оси  $r$  и  $y$ ;  $\nu_{II}$  – коэффициент Пуассона;  $E_y$  – модуль упругости;  $N$  – термоконцентрационная функция [5, 7],

$$N = \beta_T (T - T_0) + \sum_{\psi} \beta_{\psi} (\omega_{\psi} - \omega_{\psi 0});$$

$\omega_{\psi}$  – массосодержание компонента  $\psi$ ,  $\beta_T = (\partial x / \partial T) / x$  и  $\beta_{\psi} = (\partial x / \partial \omega_{\psi}) / x$  – средние коэффициенты термического и концентрационного расширения в интервалах температуры  $[T, T_0]$  и массовой концентрации компонента  $\psi$   $[\omega_{\psi}, \omega_{\psi 0}]$ . При  $r_0 = 0$ , уравнения (9) и (10) представляют решение задачи термоконцентрационного деформирования для сплошного цилиндра. Нормальные компоненты тензора деформаций  $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\varphi\varphi}$  и  $\varepsilon_{yy}$  находятся из соотношений  $\varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r$ ,  $\varepsilon_{\varphi\varphi} = u_r / r$ ,  $\varepsilon_{yy} = \partial u_y / \partial y = \varepsilon_y$ , отсюда

$$\varepsilon_r(t) = [1 + \varepsilon_{rr}(t)][1 + \varepsilon_{\varphi\varphi}(t)][1 + \varepsilon_{yy}(t)] - 1.$$

Если тело является капиллярно-пористым, его усадкой при сушке можно пренебречь и  $\varepsilon_r = 0$ .

Далее проводится задание граничных условий. На поверхности  $r = 0$  для сплошного цилиндра имеют место условия симметрии полей температуры, концентраций и скоростей фильтрации компонентов связанного вещества (11)

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{v=0} &= 0; \quad \left. \frac{\partial U_{жс}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial U_n}{\partial r} \right|_{v=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial U_{\varepsilon}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial W_{жсr}}{\partial r} \right|_{v=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial W_{\varepsilon r}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

На поверхностях, контактирующих с сушильным агентом задаются граничные условия третьего рода

$$\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T}{\partial v} \right|_{v=0} = \alpha (T_c - T|_{v=0}) - LI, \quad (12)$$

$$D_{жс} \left. \frac{\partial U_{жс}}{\partial v} \right|_{v=0} + \left. \frac{\partial (w_{жсv} U_{жс})}{\partial v} \right|_{v=0} = I, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} -D_n \left. \frac{\partial U_n}{\partial v} \right|_{v=0} + \left. \frac{\partial (w_{\varepsilon v} U_n)}{\partial v} \right|_{v=0} &= \\ &= \gamma_{nc} (U_n|_{v=0} - \rho_{nc} \Psi_n), \\ U_{\varepsilon}|_{v=0} &= \frac{P_c \Psi_{\varepsilon} \mu_{\varepsilon}}{RT|_{v=0}} - U_n|_{v=0} \frac{\mu_{\varepsilon}}{\mu_n}. \end{aligned} \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определялся с использованием формулы [8]  $Nu = 0,98(0,43 + 0,55 Re^{0,5} Pr^{0,38})$ . Для поверхности  $r = r_0$  при  $T_c = \text{const}$  можно принять  $Nu = 3,66$  [8].

Решение дифференциальных уравнений (1)...(4) при граничных условиях (11)...(14) может быть проведено численным методом на базе явной трёхслойной пересчётной разностной схемы Н. И. Никитенко [5] и процедуре расщепления алгоритма по физическим факторам. Разностная аппроксимация уравнения переноса жидкой фазы (2) на неравномерной разностной сетке  $r_i = R_{en} + ih$ , ( $i = 0, 1, \dots, I$ ;  $h \neq \text{const}$ ,  $R_{en} > 0$ ),  $x_m = mh_y$ , ( $m = 0, 1, \dots, M$ ;  $h_y = \text{const}$ ),  $t_n = n\ell$  ( $n = 0, 1, \dots, \ell > 0$ ) в соответствии с указанной схемой представляется в виде

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} - U_{ж,i,m}^n}{\ell} = \\ = - \left[ \left( (w_{жсr} U_{жс})_{i+1,m}^n - (w_{жсr} U_{жс})_{i,m}^n \right) - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[ \left( (w_{жсr} U_{жс})_{i,m}^n - (w_{жсr} U_{жс})_{i-1,m}^n \right) / (2h^2) - \right. \\
 & \quad \left. - \left[ \left( (w_{жсy} U_{жс})_{i,m+1}^n - (w_{жсy} U_{жс})_{i,m}^n \right) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \left[ \left( (w_{жсy} U_{жс})_{i,m}^n - (w_{жсy} U_{жс})_{i,m-1}^n \right) \right] / (2h_y^2) \right] \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 + \Omega_{жс}) \frac{\tilde{U}_{жс,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{жс,i,m}^{n+1}}{\ell} - \Omega_{жс} \frac{U_{жс,i,m}^n - U_{жс,i,m}^{n-1}}{\ell} = \\
 & - \left[ \left( (w_{жсr} \bar{U}_{жс})_{i+1,m}^{n+1} - (w_{жсr} \bar{U}_{жс})_{i,m}^{n+1} \right) - \right. \\
 & - \left[ \left( (w_{жсr} \bar{U}_{жс})_{i,m}^{n+1} - (w_{жсr} \bar{U}_{жс})_{i-1,m}^{n+1} \right) \right] / (2h^2) - \\
 & - \left[ \left( (w_{жсy} \bar{U}_{жс})_{i,m+1}^{n+1} - (w_{жсy} \bar{U}_{жс})_{i,m}^{n+1} \right) - \right. \\
 & - \left. \left. \left. \left( (w_{жсy} \bar{U}_{жс})_{i,m}^{n+1} - (w_{жсy} \bar{U}_{жс})_{i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{2r_{i,m}} \left[ \left( D_{жс,i+1,m} r_{i+1,m} + \right. \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \left. + D_{жс,i,m} r_{i,m} \right) \left( \bar{U}_{жс,i+1,m}^{n+1} - \bar{U}_{жс,i,m}^{n+1} \right) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \left( D_{жс,i,m} r_{i,m} + D_{жс,i-1,m} r_{i-1,m} \right) \times \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \left. \times \left( \bar{U}_{жс,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{жс,i-1,m}^{n+1} \right) \right] / h^2 + \right. \\
 & \quad \left. + \left[ \left( D_{жс,i,m+1} + D_{жс,i,m} \right) \left( \bar{U}_{жс,i,m+1}^{n+1} - \bar{U}_{жс,i,m}^{n+1} \right) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \left( D_{жс,i,m} + D_{жс,i,m-1} \right) \times \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \left. \times \left( \bar{U}_{жс,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{жс,i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) - I_V ; \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\frac{U_{жс,i}^{n+1} - \tilde{U}_{жс,i}^{n+1}}{\ell} = \frac{\tilde{U}_{жс,i}^{n+1}}{1 + \varepsilon_V} \frac{\varepsilon_{V^{n+1}} - \varepsilon_{V^n}}{\ell} \quad (17)$$

Дифференциальные уравнения (3), (4) аппроксимируются аналогично. Уравнение переноса энергии (1), не содержит функцию  $\varepsilon_V$  и аппроксимируется разностными уравнениями вида (15), (16).

Необходимые условия устойчивости уравнений вида (15...17) находятся методом условного задания некоторых искомым функций системы [5]:

$$\ell_{жс} \leq \left( \frac{w_{жсr}}{h} + \frac{w_{жсy}}{h_y} \right)^{-1};$$

$$(1 + 2\Omega_{жс}) / \left[ 2D_{жс} \left( h^{-2} + h_y^{-2} \right) \right].$$

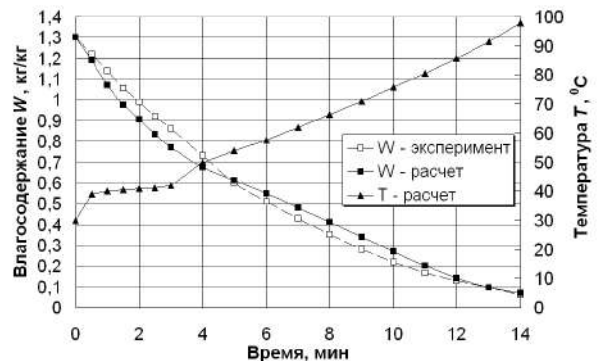
Расчётный шаг по времени определяется из условия  $\ell \leq \min(\ell_T; \ell_{жс}; \ell_n; \ell_\theta)$ .

Разностная аппроксимация граничного

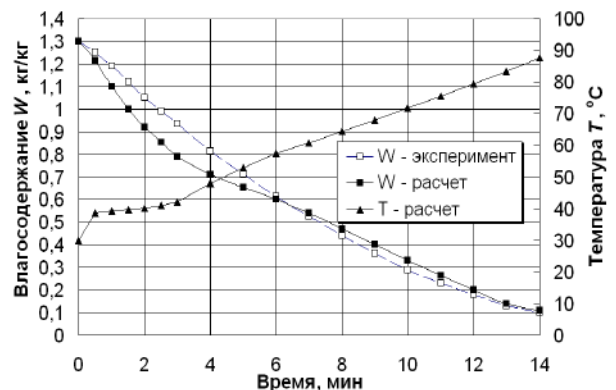
условия (13) для поверхности  $r = R$  представляется в виде

$$\begin{aligned}
 & D_{жс} \frac{\bar{U}_{жсl}^{n+1} - \bar{U}_{жсl-1}^{n+1}}{h} = \\
 & = \gamma_c \left\{ \varphi_{ml} \left[ \exp(A/R_y \bar{T}_l^n) - 1 \right]^{-1} - \right. \\
 & \quad \left. - \varphi_c \left[ \exp(A/R_y T_c) - 1 \right]^{-1} \right\}.
 \end{aligned}$$

**Обсуждение результатов.** Для подтверждения адекватности разработанной математической модели и эффективности численного метода расчёта на стенде Института технической теплофизики НАН Украины было проведено физическое моделирование кинетики сушки частиц энергетической вербы цилиндрической формы в потоке воздуха и математическое моделирование процесса при тех же исходных данных, а именно,  $T_0 = 303 \text{ K}$ ;  $W_0 = 1,3 \text{ кг/кг}$ ;  $\lambda_m = 0,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ ;  $c_m = 1840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;  $\rho_m = 450 \text{ кг/м}^3$ ;  $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}$ ;  $\Pi = 0,58$ .



а



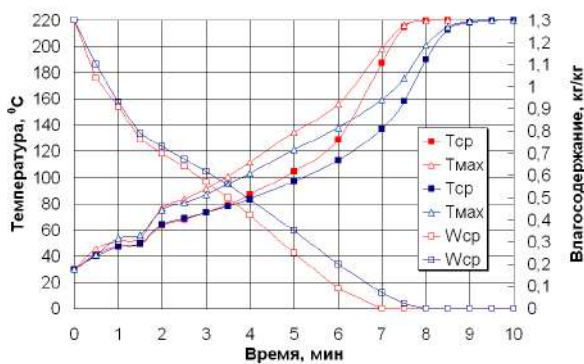
б

Рис. 1. Изменение во времени средних значений влагосодержания  $W$  и температуры  $T$  частиц энергетической вербы цилиндрической формы различного диаметра при сушке в потоке воздуха с параметрами  $T_c=120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $w_c = 2 \text{ м/с}$ ,  $d_c = 18 \text{ г/кг с.в.}$ : а -  $d/h = 4,2/10 \text{ мм}$ ; б -  $d/h = 5,6/10 \text{ мм}$   
Результаты расчёта и полученные экспери-

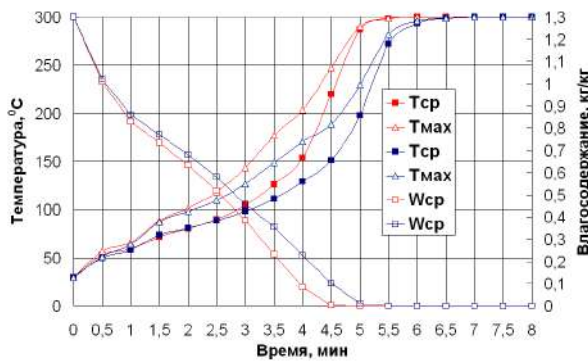
ментальные данные, представленные на рис. 1, достаточно хорошо согласуются.

Далее проводился расчёт высокотемпературной сушки цилиндрических частиц энергетической вербы в потоке дымовых газов в условиях равномерного обдува. Температура теплоносителя задавалась в интервале 200...500 °C. На рис. 2 представлены результаты численных экспериментов для некоторых температур.

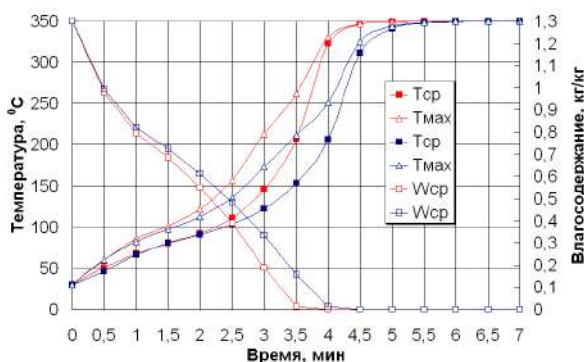
Для практического использования результатов расчёта динамики сушки для определения времени достижения равновесного влагосодержания частицами данного размера в зависимости от температуры теплоносителя, их удобно обобщать в виде номограмм (рис. 3).



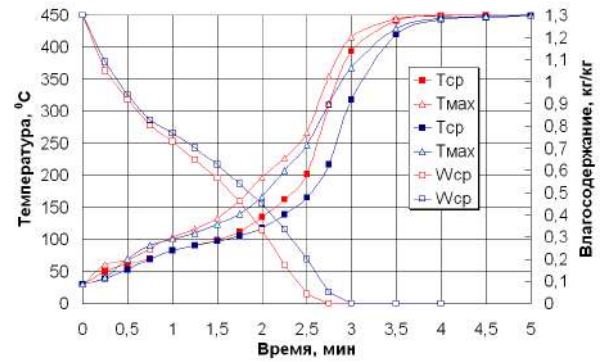
а)  $T_c = 220 \text{ }^\circ\text{C}$



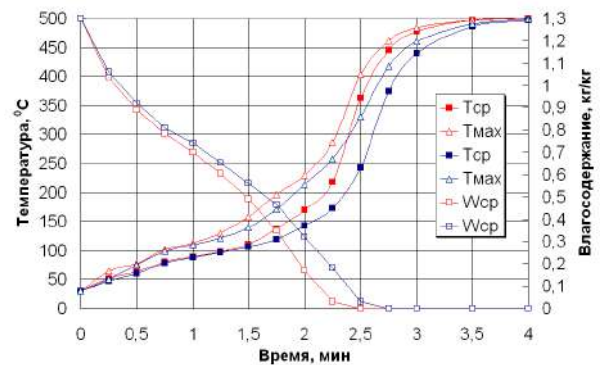
б)  $T_c = 300 \text{ }^\circ\text{C}$



в)  $T_c = 350 \text{ }^\circ\text{C}$



г)  $T_c = 450 \text{ }^\circ\text{C}$



д)  $T_c = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 2. Изменение во времени средних значений влагосодержания  $W$ , температуры  $T$  и максимальной температуры  $T_{\max}$  на поверхности цилиндрических частичек энергетической вербы с размерами  $d/h = 4,2/10$  мм (красные линии) и  $d/h = 5,6/10$  мм (синие линии) при обезвоживании в потоке сушильного агента с параметрами  $w_c = 2$  м/с,  $d_c = 18$  г/кг с.в. и разными значениями температуры  $T_c$ .

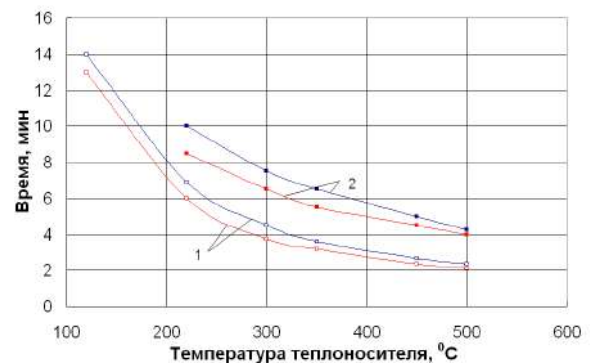


Рис.3 Время достижения частичками энергетической вербы равновесного (0,1 кг/кг) влагосодержания (кривые 1) и температуры теплоносителя (кривые 2) после обезвоживания в зависимости от температуры теплоносителя.

**Выводы.** Результаты математического моделирования динамики и кинетики тепломассопереноса и фазовых превращений при обезвоживании частичек биомассы цилиндрической формы свидетельствуют, что небольшие размеры частиц и высокие коэффициенты теплоотдачи при высокотемпературной сушке обуславливают их интенсивное обезвоживание, причём при



достигненим матеріалом рівнесного влого-держання температура на зовнішніх границях частиць не успеває достигти значення температури сушильного агента. Это дозволяє робити вибір в користь можливого підвищення температури теплоносія до значень, перевищують температуру термодеструкції для даного

матеріала, з метою інтенсифікації процесу.

#### Перспективи дальніших досліджень.

Проведення досліджень, дозволяють оцінити вплив проходження процесу термодеструкції біомаси на динаміку її обезвоживання.

#### Література

1. Сорокова Н. М. Математичне моделювання динаміки сушіння капілярно-пористих тіл циліндричної форми кінцевої довжини / Н. М. Сорокова // Харчова промисловість. – 2008. – №6. – С. 67 – 69.
2. Никитенко Н. И. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолabileльных материалов / Н. И. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сорокова // ИФЖ. – 2005. – Т. 78. – № 1. – С. 74 – 87.
3. Никитенко Н. И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах / Н. И. Никитенко // ИФЖ. – 2000. – Т. 73. – № 4. – С. 851-839.
4. Никитенко Н. И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц / Н. И. Никитенко // ИФЖ. – 2002. – Т.75. – № 3. – С. 128-134.
5. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена / Н. И. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сорокова, Ю. Н. Кольчик. – Киев: Наукова думка, 2014. – 744 с.
6. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва: Энергия, 1968. 372 с.
7. Никитенко Н. И. Метод канонических элементов для моделирования переносных процессов в многосвязных областях произвольной формы / Н. И. Никитенко, Ю. Н. Кольчик // Инж.-физ. журнал – 1999. – Т.72. – № 5. – С. 837 – 843.
8. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

#### References

1. Sorokova N. M. “Matematychnе modeliuвання dynamiky sushinnia kapiliarno-porystykh til tsylindrychnoi formy kintsevoi dovzhyny.” *Kharchova promyslovist*, no. 6, 2008, pp. 67-69.
2. Nikitenko N. I., Snezhkin Yu. F., Sorokovaia N. N. “Matematicheskoe modelirovanie teplomassoperenosa, fazovykh prevrascheniy i usadki s tseliu optimizatsii protsessа sushki termolabilelynykh materialov.” *Inzh.-fiz. zhurn.*, vol. 78, no. 1, 2005, pp. 74 – 87.
3. Nikitenko N. I. “Problemy radiatsionnoi teorii teplo- i massoperenosa v tverdykh i zhidkikh sredakh.” *Inzh.-fiz. zhurn.*, vol. 73, no. 4, 2000, pp. 851– 839.
4. Nikitenko N. I. “Issledovanie dinamiki ispareniya kondensirovannykh tel na osnove zakona intensivnosti spektralnogo izlucheniya chastits.” *Inzh.-fiz. zhurn.*, vol. 75, no. 3, 2002, pp. 128-134
5. Nikitenko N. I., Snezhkin Yu. F., Sorokovaia N. N., Kolchik Yu. N. *Molekulyarno-radiatsionnaya teoriya i metody rascheta teplo- i massoobmena*. Naukova dumka, 2014.
6. Lykov A. V. *Teoriya sushki*. Energiya, 1968.
7. Nikitenko N. I., Kolchik Yu. N. “Metod kanonicheskikh elementov dlya modelirovaniya perenosnykh protsessov v mnogosvyaznykh oblastyakh proizvolnoy formy.” *Inzh.-fiz. zhurn.*, vol.72, no. 5, 1999, pp. 837-843.
8. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha*. Energoizdat, 1981.

УДК 532.516:536.

## Математична модель і метод розрахунку динаміки сушіння біомаси при виробництві пелет

Н.М. Сорокова<sup>1</sup>, Д. М. Корінчук<sup>2</sup>, Ю.М.Кольчик<sup>3</sup>, Р.О. Шапар<sup>4</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, n.sorokova@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3529-7145

<sup>2</sup>к.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, ntps@i.ua, ORCID: 0000-0001-7752-4345

<sup>3</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна, yulia@orblink.kiev.ua, ORCID: 0000-0003-4559-5725

<sup>4</sup>к.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, r.sh@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6448-8760

*Анотація. Пелети є одним з перспективних джерел енергії. При їхньому виробництві необхідна правильна організація процесу сушіння сировини. Температура процесу не повинна досягати верхньої критичної межі – 270 °С – при якій відбувається термодеструкція, що призводить до втрати горючої складової сировини. Для цього розроблено математичну модель і чисельний метод розрахунку динаміки тепломасопереносу, фазових перетворень і усадки при сушінні колоїдних капілярно-пористих тіл циліндричної форми в умовах рівномірного обдування теплоносієм. Математична модель будувалася на базі диференціального рівняння переносу субстанції (енергії, маси, імпульсу) в деформованих системах. Проведено експериментальні дослідження кінетики зневоднення частинок енергетичної верби в потоку повітря з метою верифікації математичної моделі. Зіставлення результатів чисельних і фізичних експериментів свідчать про адекватність математичної моделі і ефективності методу її реалізації. На їхній основі можливо проводити дослідження динаміки тепломасопереносу при сушінні частинок різних видів подрібненої біомаси; визначати час досягнення рівноважного вологовмісту залежно від властивостей матеріалу і сушильного агента. На основі цих даних можливо вибирати оптимальні з точки зору збереження енергії та якості висушеного продукту режимні параметри процесу.*

*Ключові слова: біомаса, сушка, математичне моделювання, циліндрична частка, барабанна сушарка*

**UDC 532.516: 536**

## **Mathematical Model and Method for Calculating the Dynamics of Drying Biomass at the Production of Pellets**

N. N. Sorokova<sup>1</sup>, D. N. Korinchuk<sup>2</sup>, Ju. N. Kolchuk<sup>3</sup>, R. A. Shapar<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, S.Res. Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kiev, [n.sorokova@ukr.net](mailto:n.sorokova@ukr.net), ORCID: 0000-0002-3529-7145

<sup>2</sup> PhD, S.Res. Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kiev, [ntps@i.ua](mailto:ntps@i.ua), ORCID: 0000-0001-7752-4345

<sup>3</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine, [yulia@orblink.kiev.ua](mailto:yulia@orblink.kiev.ua), ORCID: 0000-0003-4559-5725

<sup>4</sup>PhD, S.Res. Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kiev, [r.sh@ukr.net](mailto:r.sh@ukr.net), ORCID: 0000-0001-6448-8760

*Abstract. All types of biomass (straw, stalks of corn, sunflower, wood shavings, energy willow, sorghum, miscanthus) are colloidal capillary-porous bodies, drying of which is carried out in a high-temperature drying agent and involves the passage of transfer processes due to diffusion, filtration and phase transformations. A mathematical model and a numerical method for calculating the dynamics of heat and mass transfer, phase transformations and shrinkage during the drying of colloidal capillary-porous cylindrical bodies under conditions of uniform cooling by a coolant are developed. The mathematical model was built on the basis of the differential equation of substance transfer (energy, mass, momentum) in deformable systems. It includes the equations diffusion-filtration transfer of energy for the system as a whole, and the mass transfer of the liquid, vapour and air phases in the pores of the body. Formulas are presented for finding the diffusion coefficients in the liquid and gas phases, for the evaporation rate on the surfaces and in the pores of the particles. Experimental studies of the kinetics of dehydration of energy willow particles in the air flow were carried out to verify the mathematical model. Comparison of the results of numerical and physical experiments testify to the adequacy of the mathematical model and the effectiveness of the method for its implementation. On their basis, it is possible to conduct a study of the dynamics of heat and mass transfer during drying of particles of various types of shredded biomass; determine the time to achieve an equilibrium moisture content depending on the properties of the material and the drying agent. It has been established that the small sizes of biomass particles and high heat transfer coefficients at high temperature drying cause their intensive dehydration, and when the material reaches an equilibrium moisture content, the temperature at the outer boundaries of the particles does not reach the temperature of the drying agent. On the basis of these data it is possible to select the process parameters that are optimal from the point of view of energy and quality preservation of the dried product.*

*Keywords: biomass, drying, mathematical modeling, cylindrical particle, drum dryer*

Надійшла до редакції / Received 06.09.2018.

# Top **Technik**

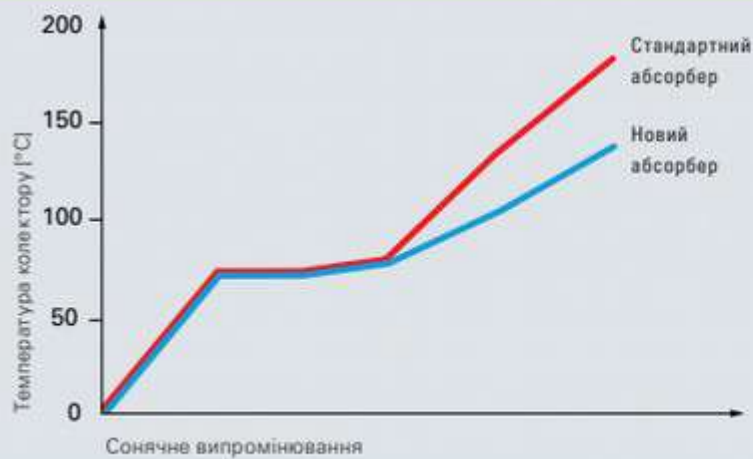
Сонячні колектори з інноваційною технологією ThermProtect для надійного захисту від перегріву



Системи сонячних колекторів для нагріву максимальної кількості гарячої води і максимальної економії енергоресурсів, потребують встановлення якомога більшої площі сонячних колекторів. Але в найбільш спекотні літні дні це може призводити до того, що колектори будуть виробляти «надлишкове» тепло, що приведе до закипання теплоносія в колекторах і зупинки в роботі всієї системи.

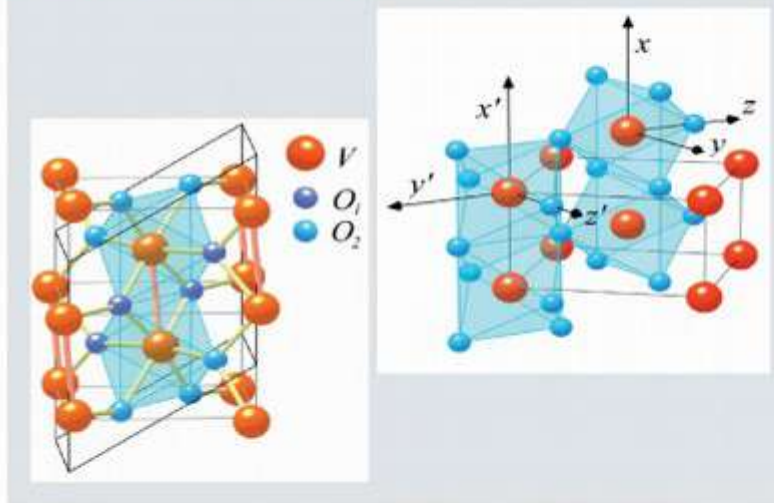
Для таких систем Viessmann пропонує сонячні колектори, які самостійно регулюють максимальну робочу температуру і здатні надійно захищати систему від закипання: вакуумні колектори Vitosol 300-T тип SP3C і нові плоскі колектори Vitosol 100-FM та Vitosol 200-FM з абсорбером ThermProtect, що змінює свої властивості в залежності від робочої температури.

## Захист від закипання теплоносія



В діапазоні стандартних робочих температур абсорбер нового колектору працює так само, як і стандартний абсорбер. А при температурах вище +75°C він починає змінювати свої властивості. Здатність абсорберу віддзеркалювати сонячні промені багаторазово збільшується, гарантуючи тим самим не закипання теплоносія в колекторі.

## Зміна оптичних властивостей абсорберу



Новий абсорбер складається з багатьох шарів. Один з цих шарів - оксид ванадію (VO<sub>2</sub>). При температурах вище +75°C оксид ванадію починає змінювати свої оптичні властивості. При розігріванні значно збільшується його теплове випромінювання і завдяки цьому зменшується температура колектору. І, чим вище буде температура абсорберу, тим вище буде його теплове випромінювання. Особливо сильно цей ефект проявляється при температурах абсорберу від +100°C.

Сонячний колектор завжди виробляє тепло, коли на нього попадають сонячні промені. Навіть тоді, коли в цьому теплі не має потреби. Наприклад, влітку, коли мешканці будинку ідуть у відпустку. Сонячні колектори нагрівають наявні баки запасу гарячої води і буферну ємність. Але якщо гарячою водою ніхто не користується, то сонячні колектори нагрівають баки до максимальних температур і відключаються. Якщо при цьому на колекторі будуть попадати сонячні промені, то це призведе до закипання в них теплоносія. Це негативно впливає на сам теплоносій – термін його експлуатації зменшується. Поряд з цим, значних термічних навантажень зазнають і компоненти системи: трубопроводи, арматура, ущільнення, циркуляційний насос і т. д. В нових сонячних колекторах з інноваційним абсорбером ThermProtect закипання теплоносія гарантовано виключається.

## Плоскі колектори з абсорбером, який «переключається»

Вперше винайдено і запатентовано плоский колектор, що при досягненні певної робочої температури припиняє перетворення сонячної енергії на теплову. Інноваційне селективне покриття абсорберу колекторів Vitosol 100-FM та Vitosol 200-FM базується на принципі шарів, що переключаються. В залежності від температури колектору вони змінюють структуру кристалів, що впливає на коефіцієнт поглинання і віддзеркалювання абсорберу. При температурі абсорберу більше +75°C починає змінюватись структура кристалів шарів селективного покриття, через що віддзеркалювання сонячних променів від абсорберу багаторазово збільшується. Завдяки цьому при подальшому збільшенні температури зменшуються потужність і температура колектору в стані стагнації. Це гарантує не закипання теплоносія в колекторі.

При зменшенні температури колектору нижче +75°C структура кристалів повертається в її початковий стан. В робочому стані абсорбер колектору поглинає і перетворює на теплову енергію більше ніж 95% сонячної енергії, що попадає на нього. Таким чином потужність нових колекторів буде більшою ніж у існуючих колекторів, завдяки тому, що теплоносій в них не буде закипати і системи з такими колекторами не будуть переходити в стан стагнації. Кількість змін структури кристалів шарів селективного покриття не обмежена, що гарантує довготривалий термін експлуатації сонячних колекторів.

### Вакуумні колектори з функцією термостатичного переключення

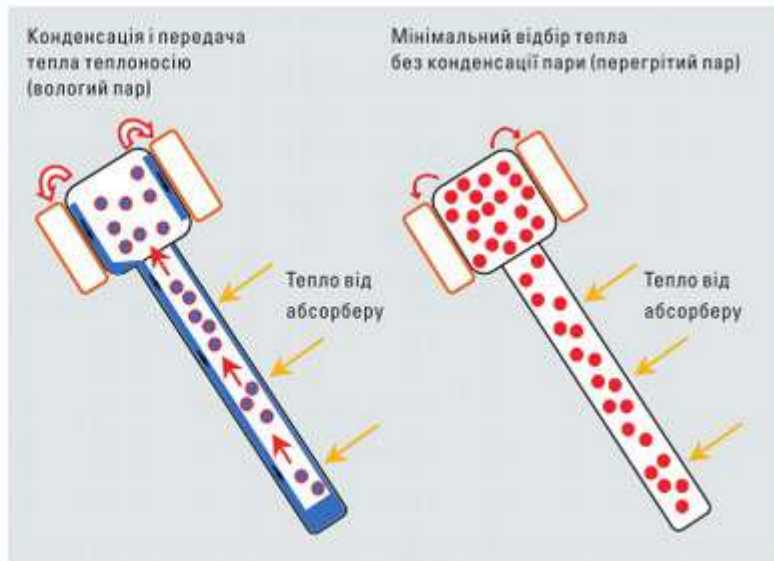
Сонячний колектор Vitosol 300-T тип SP3B – це високоєфективний вакуумний сонячний колектор, що працює за принципом теплової труби.

Сонячна енергія передається рідині, що знаходиться в середині теплової труби. Внаслідок цього вона закипає та у вигляді пари піднімається у верхню частину теплової труби до конденсатора, де передає тепло теплоносію, що знаходиться в системі сонячних колекторів. Охолоджений теплоносієм у вигляді рідини стікає в нижню частину теплової труби, де знову нагрівається від сонячних променів.

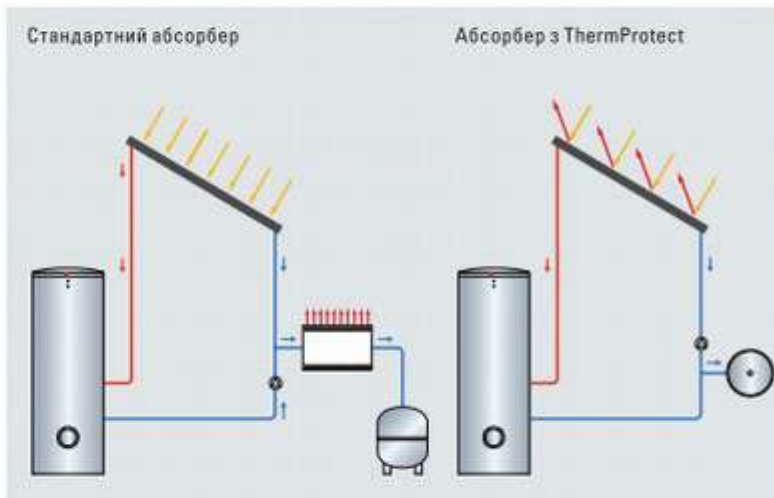
При температурі більше ніж  $+145^{\circ}\text{C}$  припиняється конденсація теплоносія в теплової трубі і він повністю переходить в пароподібний стан. При цій температурі також спрацьовує вбудований в теплову трубу термостат, що відключає її від системи. Цим самим припиняється теплопередача від теплової труби до теплоносія в системі сонячних колекторів. Таким чином система є захищеною від закипання. Коли ж на колектор знову поступає теплоносієм системи, це призводить до конденсації пари в конденсаторі теплової труби і відключення захисного термостату – колектор знову повертається в робочий стан.

### Переваги нових колекторів

- Висока надійність системи завдяки роботі без закипання теплоносія
- Незалежність від механічних несправностей, помилок в налаштуваннях, зникнення електроживлення
- Значно менше навантаження на компоненти системи за рахунок не закипання теплоносія
- Спрощений підбір компонентів системи (наприклад, мембранний бак)
- Пуск системи в роботу в будь-який момент, навіть після тривалого простою
- Відсутність будь-яких перегрівів в літній час



При температурах більше  $+145^{\circ}\text{C}$  теплоносієм в вакуумній трубці Vitosol 300-T більше не конденсується в конденсаторі і передача тепла теплоносієм системи зупиняється.



В системах з сонячними колекторами Vitosol 100-FM і 200-FM гарантується не закипання теплоносія.

### Просте проектування систем з сонячними колекторами

Температурне відключення обох типів колекторів працює повноцінно незалежно від конфігурації установки і налаштувань регулятора системи. Таким чином система сонячних колекторів надійно захищена від закипання. Температурне навантаження на сам колектор чи теплоносієм в системі залишається при цьому в допустимих робочих межах.

Отже збільшується період експлуатації колектору і його загальна потужність в порівнянні із звичайними колекторами.

ТОВ «ВІССМАНН»  
Цілодобова інфолінія  
0 800 50 99 88  
[www.viessmann.ua](http://www.viessmann.ua)

УДК 631.365:167.23

## Експериментальні випробування лабораторного стенда для дослідження процесів сушіння

Д. В. Гузик<sup>1</sup>, М. П. Єршов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна, guzikh64@ukr.net

<sup>2</sup>студ. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна, nikitoshka211072@gmail.com

*Анотація. У даній статті розглянуто розробку лабораторного стенду для дослідження процесів сушіння. Було проведено різноманітні випробування даного «індивідуального» стенду на аеродинамічні та температурні показники. Великою перевагою даного лабораторного стенду є можливість регулювати кількість повітря, яке проходить через даний стенд та кількість теплоти. Недоліком даного стенду є калориферна установка, яка має занадто велику потужність. У ході випробувань проведено модернізацію установки для покращення вихідних параметрів задля поліпшення перебігу процесу конвективного сушіння. Проведено дослідження конвективного сушіння сливи та інших фруктів. Виконано порівняння конвективного сушіння сливи порівняно з природним сушінням. У подальшому на даному лабораторному стенді можна провести лабораторні дослідження щодо впливу різної кількості (витрати) сушильного агента при сталій температурі на швидкість сушіння продукції та смакові показники. Також треба зазначити, що даний стенд для дослідження конвективного сушіння можна використовувати для проведення досліджень процесів сушіння овочів, фруктів, ягід, грибів та іншої рослинної сировини як в навчальному процесі, так і для проведення науково-дослідних робіт.*

*Ключевые слова: сировина, сушильна камера, природне сушіння, конвективне сушіння.*

**Вступ.** Україна – плодоносний край, де вирощують велику кількість різних овочів, фруктів та інших культур. Для збільшення терміну придатності продукти обробляють різними способами, одним з яких є сушіння.

**Актуальність дослідження.** У наш час застосовують сушіння лікарських трав, ягід, овочів та фруктів. Це дає змогу: зберегти корисні властивості продукції; збільшити термін придатності; зменшити площі та об'єми приміщень для зберігання продукції; зменшити вагу та обсяг продукції під час транспортування, наприклад, у туристичних походах, під час військових дій тощо. Розробка нових технологій для збереження фруктів, ягід, овочів та лікарських трав необхідна для зменшення витрат та отримання продуктів кращої якості й підвищеної цінності.

**Останні дослідження та публікації.** Головні вимоги до сушильних установок: забезпечення рівномірного сушіння та отримання високоякісної продукції в усьому об'ємі сушильної камери при високих техніко-економічних показниках: мінімальних габаритах та мінімальних витратах матеріалів на побудову сушарки, мінімальних витратах теплоти та електроенергії на висушування одного кілограма сировини, простому обслуговуванні, зменшенні вартості ремонту обладнання. Рівномірність сушіння є одним з основних факторів, що характеризують сушильну установку, особливо для установок, призначених для сушіння матеріалів, у яких початкова

вологість може змінюватись у широких межах (наприклад, у зерна). Важливою вимогою є можливість висушування партій сировини з різною вологістю за один прохід.

Для зменшення тривалості сушіння важливо інтенсифікувати процеси зовнішнього тепло- та масообміну, а для багатьох продуктів і матеріалів інтенсифікувати процеси внутрішнього перенесення теплоти й маси. Для підвищення ефективності й продуктивності установок використовують збільшення напруги, об'єму сушильної камери, сушильні агенти з високою початковою температурою, комбіновані методи підведення енергії, раціональне приєднання сушильних установок в енергетичну та теплову схеми підприємства тощо.

Ефективність сушильних установок багато в чому залежить від вибраних методів та режимів сушіння, типу установки та її розрахунку. Проектування та розрахунок сушильних установок мають базуватися на відомих основних принципах технології сушіння: залежно від властивостей об'єктів сушіння вибирається найбільш раціональний метод і оптимальний режим сушіння, а на цій основі проводять вибір або розробку сушильної установки [1].

У конвективних сушарках (табл. 1), які найбільше поширені в промисловості, сушильним агентом є нагріте повітря чи суміш його з димовими або топковими газами.

Основні типи конвективних сушильних установок [2]

Класифікаційна ознака	Типи сушильних установок
Режим роботи (спосіб дії)	а) періодичної дії; б) неперервної дії; в) циклічної дії.
Вид матеріалу, що висушується	а) кусковий (поштучний); б) зернистий (дисперсний); в) пилоподібний; г) пастоподібний; д) рідкий (розчин).
Тиск у сушильній камері	а) герметичні камери з надлишковим тиском; б) атмосферні; в) вакуумні герметичні камери з тиском вище потрійної точки; г) середньовакуумні й глибоковакуумні (з тиском нижче потрійної точки для водяної пари).
Вид сушильного агента	а) повітряні; б) газові; в) газоповітряні; г) парові; д) рідинні.
Спосіб створення напору для переміщення сушильного агента	а) з природною циркуляцією; б) з примусовою циркуляцією.
Напрямок руху матеріалу й сушильного агента	а) прямотокове; б) протитокове; в) перехреснотокове.
Стан шару матеріалу (для зернистих матеріалів)	а) щільний; б) розрихлений; в) киплячий; г) фонтанний; д) зважений.
Спосіб нагрівання сушильного агента	а) паровими калориферами; б) водяними калориферами; в) вогняними калориферами; г) електрокалориферами.
Конструкція сушильної камери	шафові, камерні, коридорні (тунельні), трубчасті, шнекові, вальцеві, циліндричні, турбінні, каскадні, карусельні, конвеєрні (стрічкові, ящиккові, люлькові тощо) пневматичні, розпилувальні та інші
Варіант сушильного процесу	а) викидання сушильного агента назовні; б) з рециркуляцією сушильного агента; в) з проміжним підігрівом сушильного агента; г) з додатковим підігрівом сушильного агента в сушильній камері.
Спосіб видалення пари та регенерація відпрацьованого сушильного агента	а) видалення пари з відпрацьованим сушильним агентом назовні; б) змішування зі свіжим агентом і підігрів (рециркуляція); в) осушення реагентами (силікагелем тощо); г) конденсація пари в конденсаторі; д) виморожування парів у конденсаторі за допомогою холодоагенту.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є розробка лабораторного стенду для дослідження процесів сушіння різноманітної сировини, його перевірка на працездатність та проведення попередніх досліджень процесів сушіння, а також визначення недоліків та переваг різних способів сушіння сировини.

**Дослідний стенд.** Розробка нових технологій для збереження плодів та ягід необхідна для зниження витрат та отримання продуктів кращої якості й поживної цінності. На сьогодні відомо два основних способи сушіння – природне та штучне – конвективне (сушіння нагрітим повітрям). Останній спосіб є більш поширеним. Природне сушіння – дешеве й традиційне, але його застосування залежить від погодних умов і вимагає великих виробничих площ та часу для отримання готової продукції. Крім того, необхідно захистити плоди та ягоди від комах, дрібних тварин та від контакту з джерелами забруднень. При конвективному сушінні можна контролювати ці несприятливі фактори та збільшити середню швидкість сушіння, але експлуатаційні витрати при цьому збільшуються [2, 3].

Для дослідження процесів сушіння в лабораторії кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені

Юрія Кондратюка було розроблено стенд камерної конвективної сушарки (рис. 1).

Основним елементом розробленої конвективної сушарки є камера, всередині якої розташовують сировину, що залишається нерухою протягом усього процесу сушіння [4]. Для забезпечення руху повітря, що виступає як агент сушіння, було використано каналний вентилятор фірми Systemair (Швеція) типу KV 160 M з частотним регулятором. Це дало змогу регулювати кількість обертів робочого колеса нагнітача та, відповідно, регулювати кількість повітря, що проходило крізь камеру.

Для підігріву повітря було використано електричний калорифер фірми Aerostar (Україна) марки SEH 50-25/22,5. Цей калорифер має дев'ять ТЕНів, кожний потужністю 2,5 кВт. Відповідно його сумарна потужність становить 22,5 кВт. Розроблений стенд має можливість модуляції у використанні одного, двох, трьох чи більшої кількості ТЕНів залежно від витрати агента сушіння та необхідної температури.

Сушильна камера вертикальна. Стінки камери зроблені з дерев'яних щитів, які ззовні утеплені пінопластом завтовшки 25 мм. Внутрішня поверхня щитів вкрита прошарком харчової фольги, для зменшення тепловтрат за рахунок променевої складової.



Рис. 1. Загальний вид стенда



У дверцятах камери було зроблено віконце для можливості візуально спостерігати за процесами, що відбуваються всередині.

Для спрямування та рівномірного розповсюдження повітря, що рухається крізь камеру пінополістиролу, були змонтовані напрямні елементи, які також були вкриті фольгою. Для спостережень за процесом сушіння та зняття показів термометра, що вимірював температуру повітря всередині камери, стенд було обладнано лампою “холодного світла” (рис 2).

Для контролю параметрів повітря, що виступало як агент сушіння, на вході та виході з камери стенд було встановлено два аспіраційних психрометри марки *МВ-4М*.

**Дослідження аеродинамічних характеристик.** Після завершення робіт з монтажу стенда й перших пробних пусків устаткування відбулося тестування аеродинамічних характеристик сушарки. Так, для перевірки розподілу повітряних потоків у сушильній камері, були проведені лабораторні випробування з візуалізації руху

повітря крізь камеру. Щоб визначити розподіл потоків у різних площинах за висотою камери, до сушильних рамок рівномірно були прикріплені короткі нитки. Після розміщення сушильних рамок по всій висоті сушильної камери й увімкнення нагнітача, через оглядове віконце були проведені візуальні спостереження з метою визначення “застійних зон”. Досліди показали наявність таких зон, оскільки на деяких частинах рамок нитки майже не ворушилися. Для запобігання утворення “застійних зон” та задля рівномірного розподілу повітряних потоків у камері було встановлено шибер (рис. 2), що дало змогу вирівняти епіюру повітряного потоку за всю висотою камери й одночасно проводити сушіння на всіх ярусах даного стенду.

**Дослідження температурного режиму.** Після визначення аеродинамічних характеристик лабораторного стенда були проведені дослідження температурного режиму устаткування.



Рис. 2. Внутрішнє облаштування камери

Метою проведених досліджень було визначення можливості регулювання кількісно-якісних показників параметрів агента сушіння, а саме, його температури та витрати. Перший параметр регулювався шляхом увімкнення одного, двох або трьох ТЕНів, відповідно, сумарною тепловою потужністю 2,5, 5,0 та 7,5 кВт. Другий параметр – це кількість (швидкість) повітря – зміна якого здійснювалася за допомогою частотного перетворювача. Сам експеримент проводився в три етапи, при увімкненні одного, двох та трьох ТЕНів відповідно.

На кожному етапі проводилися заміри температури при зміні витрати повітря. За результатами випробовувань було побудовано графік зміни температури у камері залежно від витрати агента сушіння (рис. 3).

На кожному етапі проводилися заміри температури при зміні витрати повітря. За результатами випробовувань було збудовано графік зміни температури у камері в залежності від витрати агента сушіння (рис. 3).

**Дослідження процесів сушіння.** При плануванні натурального експерименту було виявлено проблему майже повної відсутності літератури, в якій би чітко прописувався регламент ведення процесу сушіння конкретної сировини з чітко встановленими як температурними графіками, так і графіками швидкості (витрати) повітря.

Через те, що частково була доступна інформація про сушіння слив, а досліди проводилися саме у вересні-жовтні 2017 року, то саме цей продукт був вибраний нами для дослідження переваг та недоліків процесів природного та штучного конвективного сушіння.

Перед сушінням чисті сливи були розрізані навпіл, з них була видалена кісточка. Надалі натурний експеримент проводився з двома рівними за вагою партіями слив, одна з яких розміщувалась у сушарці (досліджувався процес примусового конвективного сушіння), а друга – розташовувалася на такому ж “ситі”, але його було розміщено над корпусом електрокалорифера лабораторного стенда на відстані 100 мм (рис. 4).

Дослід тривав три дні. Кожного дня сушіння проводилося протягом 4–5 годин. Рекомендована температура для сушіння сливи

в перший період складає 45...500 °С, далі температуру можна збільшити до 700 °С. Графік зміни температурного режиму протягом всього періоду сушіння у камері наведено нижче [3, 4] (рис. 5).

Було прийнято рішення оцінювати інтенсивність сушіння плодів сливи через втрату її маси, тобто кожне сушіння починалося і закінчувалося замірами маси продукту. Вимір маси продукту на початку та в кінці процесу сушіння здійснювався за допомогою побутових електронних ваг фірми Elenberg з точністю 1 г.

За результатами натурних досліджень залежно від часу та способу сушіння сировини було побудовано графік зміни маси плодів сливи (рис. 6). При цьому закінчення експерименту (через 14 годин після початку) визначалося саме якісними показниками кінцевого продукту – чорносливу, який першим був отриманий саме при використанні штучного конвективного сушіння.

**Висновки.** Аеродинамічні випробування розробленого стенда дають підстави говорити про доцільність організації руху агента сушіння чітко вздовж вертикалі, тобто для запобігання утворення “застійних зон” підведення та відведення повітря бажано здійснювати відповідно в днище та з кришки камери.

Для отримання якісного кінцевого продукту бажано використовувати устаткування для сушіння сировини, яке дає можливість експлуатаційникам одночасно змінювати параметри агента сушіння, а саме як його температуру, так і кількість повітря.

Порівняльний аналіз способів сушіння з точки зору строків отримання якісного кінцевого продукту дає перевагу на користь штучного конвективного сушіння. Збільшення експлуатаційних витрат при цьому способі сушіння потребують проведення додаткових лабораторних досліджень.

Попередні випробування створеного лабораторного стенда дають можливість використовувати його для проведення процесів сушіння овочів, фруктів, ягід, грибів та іншої рослинної сировини як у навчальному процесі, так і для проведення науково-дослідних робіт.

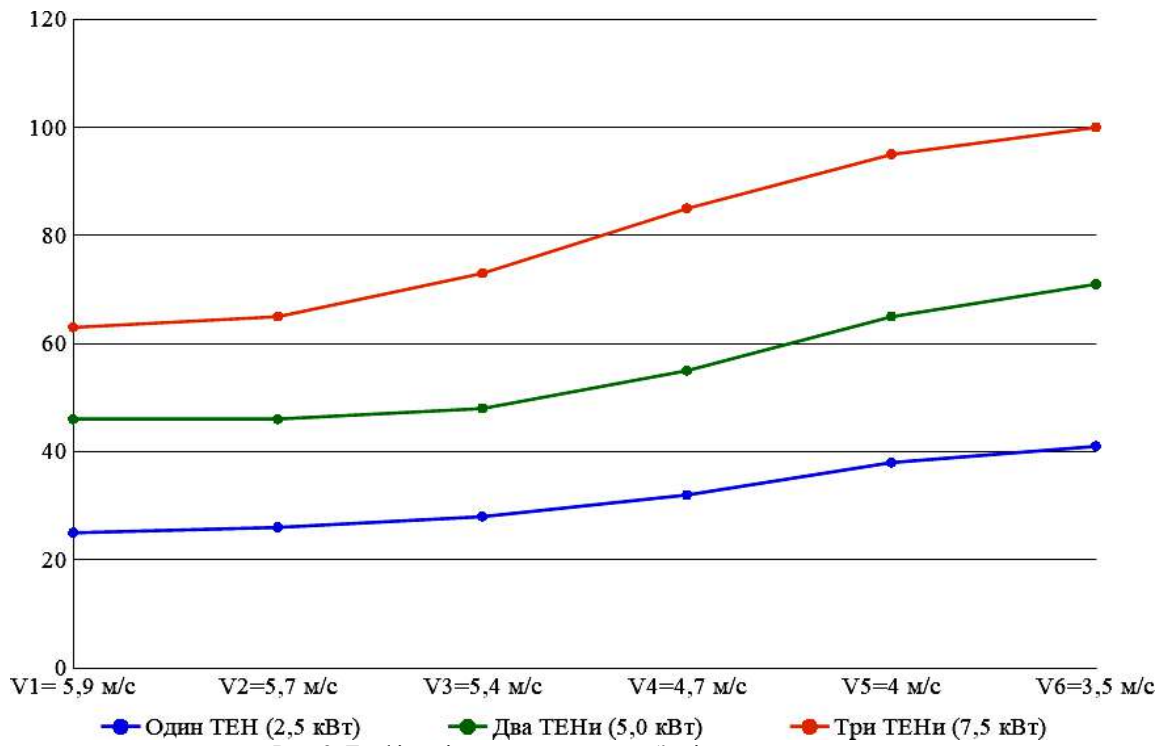


Рис. 4. Організація процесу природного сушіння під час проведення експерименту

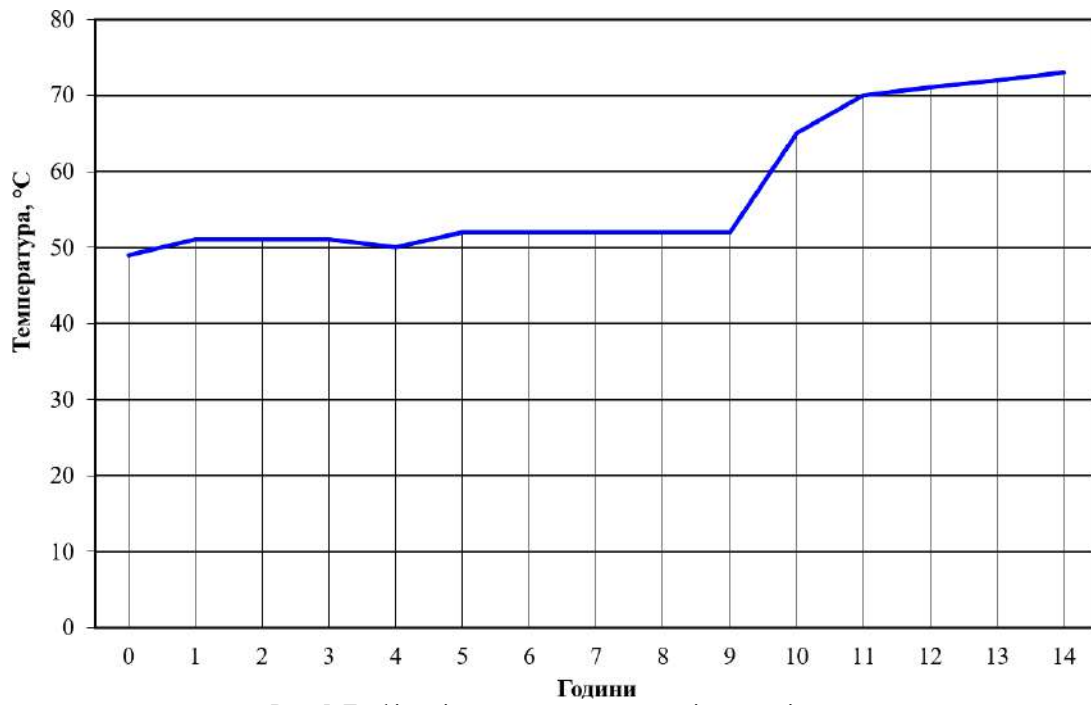


Рис. 5. Графік зміни температури в камері для сушіння

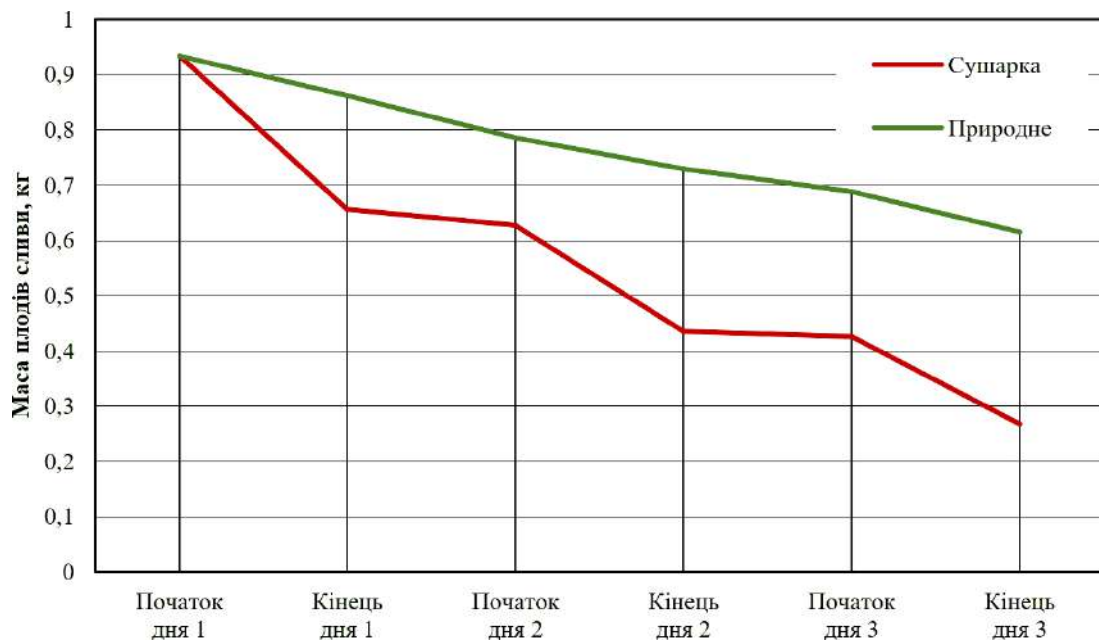


Рис. 6. Втрати маси плодів сливи залежно від способу сушіння

### Література

1. Ткаченко С. Й. Сушильні процеси та установки: навч. пос. / С. Й.Ткаченко, О. Ю.Співак. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 86 с.
2. Теоретичне дослідження способів сушіння овочів та фруктів / Тарасенко Т. А., Євлаш В. В., Неміріч О. В., Вашека О. М., Гавриш А. В., Кравченко О. І. // Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького. – 2015. – Том 17. – № 4 (64). – с. 148-158.
3. Бессараб О. С. Технологія сушіння плодів та овочів: консп. лек. / О. С. Бессараб, В. В. Шутюк – Київ: НУХТ, 2002. – 84 с.
4. Рекомендації до сушіння. <http://xcook.info/vopros-otvet/kak-sushit-slivy.html>

### References

1. Tkachenko S. I., Spivak O. Yu. *Сушильні процеси та установки*. VNTU, 2009.
2. Tarasenko T. A., Evlash V. V., Nemirich O. V., Vasheka O. M., Havrysh A. V., Kravchenko O. I. "Teoretychne doslidzhennia sposobiv sushinnia ovochiv ta fruktiv." *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S. Z. Gzhitskoho*, vol. 17, no. 4 (64), 2015, pp. 148-158.
3. Bessarab O. S., Shutiuk V. V. *Tekhnolohiia sushinnia plodiv ta ovochiv*. NUKHT, 2002.
4. *Rekomendatsii do sushinnia*. <http://xcook.info/vopros-otvet/kak-sushit-slivy.html>

УДК 631.365:167.23

## Экспериментальные испытания лабораторного стенда для исследования процессов сушки

Д. В. Гузик<sup>1</sup>, Н. П. Ершов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>К.т.н., доцент, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, [guzikd64@ukr.net](mailto:guzikd64@ukr.net)

<sup>2</sup>Студент, 6 курса, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, [nikitoshka211072@gmail.com](mailto:nikitoshka211072@gmail.com)

*Аннотация. В данной статье рассмотрена разработка лабораторного стенда для исследования процессов сушки. Были проведены разнообразные испытания данного «индивидуального» стенда на аэродинамические и температурные показатели. Большим преимуществом данного лабораторного стенда является возможность регулировать количество воздуха, проходящего через данный стенд, и количество теплоты. Недостатком данного стенда является калориферная установка, она имеет слишком большую мощность. В ходе испытаний проведена модернизация установки для улучшения выходных параметров с целью улучшенного протекания конвективной сушки. Проведено исследование по конвективной сушке сливы и других фруктов. Выполнено сравнение конвективной сушки сливы с естественной сушкой. В дальнейшем на данном лабораторном стенде можно провести лабораторные исследования по сравнению влияния разного количества (расхода) сушильного агента при постоянной температуре на скорость сушки продукции и вкусовые показатели. Также надо отметить, что данный стенд по исследованию конвективной сушки можно использовать для проведения исследований процессов сушки овощей, фруктов, ягод, грибов и другого растительного сырья как в учебном процессе, так и для проведения научно-исследовательских работ.*

*Ключевые слова: сырьё, сушильная камера, естественная сушка, конвективная сушка.*

UDC 631.365:167.23

## Experimental Tests of a Laboratory Stand for Research of Drying Processes

D.V.Guzyk<sup>1</sup>, M.P. Yershov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PhD, docent, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University Poltava, Ukraine, guzikd64@ukr.net

<sup>2</sup> student, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University Poltava, Ukraine, nikitoshka211072@gmail.com

*Abstract. Ukraine is a fruitive land, where we grow a large number of different vegetables, fruits and other crops. To increase the shelf life, the products are processed in different ways, one of which is drying. The development of new technologies for the preservation of fruits, berries, vegetables and medicinal herbs is necessary to reduce costs and obtain products of better quality and nutritional value. In this article, the development of a laboratory stand for the study of drying processes is considered. Various tests of this "individual" stand were conducted on aerodynamic and temperature indices. The great advantage of this laboratory stand is the ability to adjust the amount of air passing through this booth and the amount of heat. The disadvantage of this booth is a calorifer installation that has too much power. During the tests, a modernization of the plant was performed to improve the output parameters for improved convection drying. Convection drying of plums and other fruits was carried out, and comparison of convective drying of plums in comparison with natural drying. Taking into account the previous one, it should be noted that now two main methods of drying are known - natural and artificial, convective (drying with heated air), which is more common. Natural drying is cheap and traditional, but its application depends on the weather conditions and requires large production space and time to receive the finished product. In addition, it is necessary to protect the fruits and berries from insects, small animals and from contact with sources of dirt. With convective drying, you can control these adverse factors and increase the average drying speed, but operating costs increase. In the future, at this laboratory stand, laboratory studies can be carried out to compare the effects of different amounts of "flow" of a drying agent at a constant temperature on the speed of drying of products and taste. It should also be noted that this stand on the study of convective drying can be used to study the processes of drying vegetables, fruits, berries, mushrooms and other plant material in the educational process, as well as for research*

*Key words: raw material, drying chamber, natural drying, convective drying.*

Надійшла до редакції / Received 12.09.2018.

УДК 628.8.02

## Оцінка параметрів мікроклімату за показниками локального теплового комфорту в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій

В. О. Петренко<sup>1</sup>, К. Б. Дікарев<sup>2</sup>, А. О. Петренко<sup>3</sup>, І. В. Голякова<sup>4</sup>, І. Ф. Огданський

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, Україна, petrenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4331-6844

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, Україна, kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

<sup>3</sup>к.т.н., доц. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, Україна, PetrenkoAO@ua.fm, ORCID ID: 0000-0002-0406-9852

<sup>4</sup>к.т.н., доц. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, Україна, miheyevaiga@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7185-7202

<sup>5</sup>к.т.н., доц. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, Україна, ivan.ogdanskyu@qmail.com

*Анотація.* У статті вирішується задача оцінки параметрів мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій, із застосування показників теплового комфорту PMV (Predicted Mean Vote – очікувана середня оцінка комфорту), PPD (Predicted Percentage Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених) і критеріїв локального теплового комфорту. Завдання дослідження оцінити параметри мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій за показниками теплового комфорту PMV і PPD і критеріями локального теплового комфорту; визначити границі можливого зниження температури внутрішнього повітря в приміщенні залежно від проценту дефектної зони зовнішньої стіни, рухливої активності людини і термічного опору одягу. В основі задачі оцінки параметрів мікроклімату в приміщенні лежить розрахунковий метод для прогнозування та оцінки мікроклімату в приміщенні та його впливу на стан людини. Метод полягає в оцінці температурних відчуттів тіла та пов'язаний з його тепловим балансом. Отримані в статті аналітичні дані свідчать, що в будівлі, яка має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій, можливо виникнення дискомфортних умов параметрів мікроклімату, які впливають на тіло людини та його відчуття. Розрахунковий метод можна використовувати для прогнозування та оцінки мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій.

*Ключові слова:* мікроклімат, тепловий комфорт, PMV, PPD, дефектна зона; критерії локального теплового комфорту.

**Вступ.** У попередніх роботах авторами цієї статті, розглядалися зміни умов параметрів мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій за допомогою метода оцінки температури внутрішнього середовища [8, 9]. У цих роботах не були оцінені показники теплового комфорту PMV (Predicted Mean Vote – очікувана середня оцінка комфорту) і PPD (Predicted Percentage Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених) та критерії локального теплового комфорту для оцінки параметрів мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій. Також не визначені границі можливого зниження температури внутрішнього повітря в приміщенні залежно від проценту дефектної зони зовнішньої стіни.

**Формулювання цілей статті.** Цілями даної роботи є оцінка параметрів мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій за показниками теплового комфорту PMV і PPD та критеріями

локального теплового комфорту, а також визначення межі можливого зниження температури внутрішнього повітря в приміщенні залежно від проценту дефектної зони зовнішньої стіни, рухливої активності людини і термічного опору одягу.

**Останні дослідження та публікації.** В основі даної статті лежить розрахунковий метод [1] для прогнозування та оцінки мікроклімату в приміщенні та його впливу на стан людини, запропонований доктором Оле Фангером (Міжнародний центр з проблем внутрішнього середовища приміщень і енергетики Датського технологічного університету) та затверджений міжнародними й українськими технічними нормами [2, 3]. У методи покладено положення, яке полягає в температурних відчуттях людини, які пов'язані з його тепловим балансом. У нормативах [2, 3] як приклади розглядаються умови життєдіяльності людини, які найчастіше зустрічаються в найбільш характерних умовах. Проте вони дозволяють оцінити умови мікроклімату та їхній вплив на

самопочуття людини в інших умовах. У практиці оцінки умов мікроклімату є достатньо робіт, як міжнародних, так і українських [4, 5, 6, 7, 12, 13], що дозволяє розширити сферу використання даного методу прогнозування та оцінки мікроклімату приміщення і його впливу на стан людини.

За основу методу взяте відоме у фізіології терморегуляції положення про загальні температурні відчуття людини, які пов'язані з тепловим балансом тіла в цілому. Якщо теплопродукція людини перевищує його тепловтрати, відбувається нагрівання організму, що виражається у відчуттях «тепло», «жарко» і т. п. У зворотному випадку відбувається охолодження, що проявляється відчуттями «прохолодно», «холодно». Зазначені балансові співвідношення описуються рівняннями, які встановлюють зв'язок між наступними величинами: теплопродукція (фізична активність людини), теплоізоляційні властивості одягу, температура повітря, середня радіаційна температура поверхонь, обернених всередину приміщення, швидкості руху повітря, відносної вологості повітря. У ході розв'язку балансових співвідношень методом ітерації розраховуються температура поверхні одягу й коефіцієнт конвективного теплообміну. Якщо є результати вимірювань і (або) розрахунків цих величин, за формулою Фангера можна спрогнозувати теплове відчуття людини в тій або іншій температурній ситуації шляхом розрахунків очікуваної середньої оцінки PMV. Таким чином, показник PMV – прогнозована середня оцінка, за допомогою якої визначають середнє значення чутливості до температури великої групи людей за семибальною шкалою в діапазоні від мінус трьох до плюс трьох, де значення мінус три відповідає відчуттю людиною холоду, нульове значення – нейтральним відчуттям, а значення плюс три – відчуттям жару. Даний метод дозволяє проводити розрахунки показника PMV у вказаних межах з дробовою частиною. Поряд з показником PMV наводиться показник прогнозованого відсотку незадоволених PPD, який розраховується на основі показника PMV і дозволяє одержати інформацію про температурний дискомфорт на основі прогнозованого відсотка людей, яким занадто тепло або прохолодно в конкретному тепловому середовищі. Теплове середовище вважається прийнятним, коли таким його вважають 80 % людей (значення індексу PPD), присутніх у приміщенні, що за критерієм Фангера відповідає значенню індексів PMV в діапазоні від мінус 0,5 до плюс 0,5. При цьому

важливо відзначити, що при індексі PMV нульового рівня індекс PPD становить 5 %. Це означає, що завжди, у будь-якій ситуації є відсоток незадоволених мікрокліматом людей.

Для прогнозування показників теплового комфорту PMV, PPD і критеріїв локального теплового комфорту в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій, для зимового періоду прийняті наступні вихідні умови:

- рухлива активність середньостатистичної людини масою тіла 70 кг і зростом 1,7 м становить 70 Вт/м<sup>2</sup> або 1,2 мет (сидяча робота (офіс, вдома, у школі, лабораторії)) [3];
- середня теплоізоляція одягу людини в даний період – 0,11 (м<sup>2</sup>·К)/Вт або 0,7 кло (нижня білизна, сорочки, брюки, шкарпетки, черевики) [3];
- середня температура повітря в приміщенні житлового та громадського призначення може знаходитись у межах від 16 °С до 24 °С;
- середня температура на внутрішніх поверхнях зовнішніх огорожувальних конструкцій та предметів, які знаходяться в приміщенні може бути в межах від 16 °С до 24 °С;
- середня температура на зовнішній поверхні опалювальних приладів може знаходитись у межах від 28 °С до 105 °С залежно від зовнішніх параметрів повітря;
- швидкість повітря в приміщенні за відсутності та наявності припливних і витяжних систем вентиляції становить від 0 м/с до 0,5 м/с;
- відносна вологість внутрішнього повітря становить від 30 % до 60 %.

**Викладення основного матеріалу.** У приведених нижче розрахунках приймалися межі зміни параметрів мікроклімату згідно з розрахунками [8, 11] та методикою визначення параметрів PMV, PPD і критеріїв локального теплового комфорту [2, 3] з урахуванням дефектної зони зовнішньої огорожувальної конструкції.

У цілому даний розрахунок можна виразити системою рівнянь, які дозволяють обчислити значення PMV, PPD, критеріїв локального теплового комфорту і прогнозованої температури внутрішнього повітря приміщення, яке має декілька огорожувальних конструкцій різних типів з урахуванням ступеня дефекту зовнішньої стіни  $X_{dam}$ .



$$\left\{ \begin{aligned} PMV &= f(M, W, I_{cl}, f_{cl}, t_a, \bar{t}_r, v_{ar}, p_a, h_c); \\ PPD &= f(PMV); \\ PD &= f(t_f, \Delta t_{pr}, \Delta t_{a,v}); \\ t'_{int} &= \frac{Q_{build} \cdot (t_{int} - t_{ext})}{Q_{build}^{dam}} + t_{ext}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $M$  – швидкість обміну речовин, Вт/м<sup>2</sup>;  $W$  – ефективна механічна робота, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{cl}$  – опір теплопередачі одягу, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $f_{cl}$  – коефіцієнт площі поверхні одягу;  $t_a$  – температура повітря, °С;  $\bar{t}_r$  – середня радіаційна температура, °С;  $v_{ar}$  – відносна швидкість руху повітря, м/с;  $p_a$  – парціальний тиск водяної пари, Па;  $h_c$  – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{cl}$  – температура поверхні одягу, °С;  $t_f$  – температура підлоги, °С;  $\Delta t_{pr}$  – асиметрія теплового випромінювання, °С;  $\Delta t_{a,v}$  – вертикальна різниця температури повітря між головою і ногами, °С;  $Q_{build}$  – сумарні тепловтрати приміщення, яке не має пошкоджень зовнішніх огорожувальних конструкцій, Вт;  $Q_{build}^{dam}$  – сумарні тепловтрати приміщення, яке має дефектні зони зовнішніх огорожувальних конструкцій, Вт;  $t_{int}$  – розрахункова температура внутрішнього повітря, °С;  $t_{ext}$  – розрахункова температура зовнішнього повітря в холодний період року, °С.

У табл. 1, 2 і на рис. 1, 2 представлені результати комплексного розв'язання рівняння (1) для визначення прогнозованої середньої оцінки (PMV) та прогнозованого відсотка незадоволених температурним середовищем (PPD) залежно від ступеня дефекту зовнішньої огорожувальної конструкції. Отримані дані свідчать про можливість настання такого стану мікроклімату при якому людина буде відчувати дискомфортні внутрішні умови.

За показником прогнозованої середньої оцінки (PMV) визначаємо категорію необхідного

теплового середовища, згідно з [2, 3]. За умови наявності дефектної зони тільки зовнішньої стіни (рис. 1а), зовнішньої стіни з убудованим в нього вікном (рис. 1б), декількох різнотипових огорожувальних конструкцій та дефектної зони зовнішньої стіни з убудованим в неї вікном (рис. 1в), зміні ступеня дефекту зовнішньої стіни  $0 < x_{dam} < 1$ , зміні швидкості внутрішнього повітря  $0 < v_{ar} < 1$ , значення прогнозованої середньої оцінки знаходиться в межах  $-2,8 < PMV < +1,04$ , що відповідає найнижчому класу необхідного теплового середовища – С.

За показником прогнозованого відсотку незадоволених температурним середовищем (PPD) визначаємо категорію необхідного теплового середовища. Згідно з [2, 3] за цих же умов значення прогнозованого відсотку незадоволених температурним середовищем має значення  $PPD > 27,91$ , що відповідає також найнижчому класу необхідного теплового середовища – С.

При оцінці локального теплового комфорту використаємо дані [8, 11], що представлені в табл. 3. За даними розрахунків маємо можливість оцінити локальний дискомфорт, обумовлений асиметрією теплового випромінювання,  $\Delta t_{pr}$ , °С. Показник локального дискомфорту PD при прийнятті температури на поверхнях внутрішніх огорожувальних конструкцій рівній температурі внутрішнього повітря становить  $1,18 \% < PD < 1,3 \%$ . При таких значеннях PD, згідно з [2, 3], категорія необхідного теплового середовища відповідає класу А. При цьому потрібно розуміти, що значення асиметрії теплового випромінювання для категорії А лежать у межах  $0 < \Delta t_{pr} < 9$ . При його визначенні не враховується значення температури внутрішнього повітря, що не призводить до правильної оцінки стану мікроклімату як окремим показником.

Таблиця 1

Прогнозована середня оцінка (PMV) в залежності від ступеня дефекту зовнішньої огорожувальної конструкції

Рухливість повітря, м/с	Середня температура повітря в приміщенні, °С										
	22,0	21,5	21,0	20,5	20,0	19,5	19,0	18,5	18,0	17,5	17,0
0	-0,51	-0,64	-0,77	-0,91	-1,04	-1,18	-1,31	-1,44	-1,57	-1,71	-1,84
0,1	-0,7	-0,83	-0,97	-1,1	-1,23	-1,37	-1,5	-1,63	-1,76	-1,9	-2,03
0,2	-0,89	-1,03	-1,18	-1,32	-1,46	-1,6	-1,74	-1,89	-2,03	-2,17	-2,31
0,3	-1,03	-1,18	-1,33	-1,48	-1,62	-1,77	-1,92	-2,07	-2,22	-2,36	-2,51
0,4	-1,14	-1,29	-1,45	-1,6	-1,75	-1,91	-2,06	-2,21	-2,36	-2,51	-2,57
0,5	-1,23	-1,39	-1,54	-1,7	-1,86	-2,02	-2,17	-2,33	-2,48	-2,64	-2,8

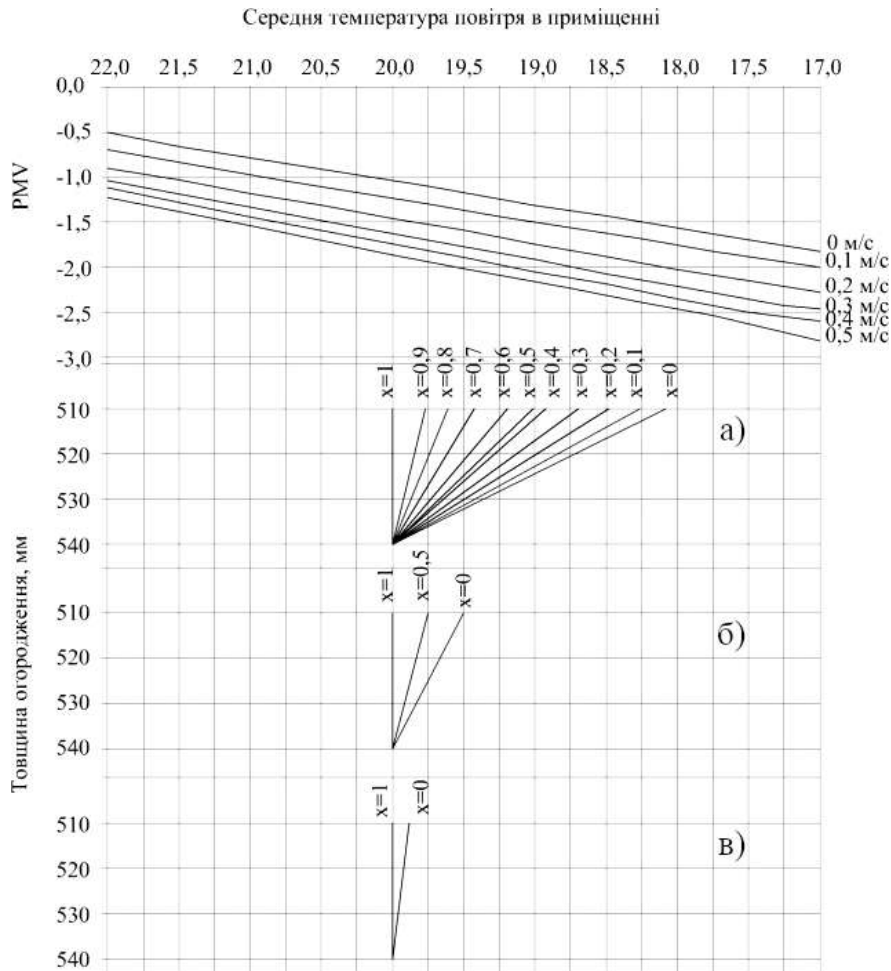


Рис. 1. Прогнозована середня оцінка (PMV) в залежності від ступеня дефекту зовнішньої огорожуючої конструкції:  
 а) за умови наявності дефектної зони тільки зовнішньої стіни [8];  
 б) за умови наявності дефектної зони зовнішньої стіни з вбудованим в нього вікна [11];  
 в) за умови наявності декількох різнотипових огорожуючих конструкцій та дефектної зони зовнішньої стіни з вбудованим в нього вікном [11]

Таблиця 2

Прогнозований відсоток незадоволених температурним середовищем (PPD) в залежності від ступеня дефекту зовнішньої огорожуючої конструкції

Рухливість повітря, м/с	Середня температура повітря в приміщенні, °C										
	22,0	21,5	21,0	20,5	20,0	19,5	19,0	18,5	18,0	17,5	17,0
0	10,37	13,62	17,64	22,42	27,91	34,04	40,7	47,73	54,95	62,13	69,05
0,1	15,18	19,56	24,69	30,51	36,91	43,77	50,91	58,12	65,19	71,89	78,01
0,2	21,69	27,51	34,08	41,23	48,79	56,51	64,12	71,36	77,95	83,7	88,48
0,3	27,33	34,19	41,69	49,62	57,7	65,62	73,06	79,75	85,46	90,08	93,6
0,4	32,26	39,87	47,99	56,35	64,59	72,36	79,35	85,31	90,11	93,73	96,29
0,5	36,6	44,76	53,29	61,84	70,02	77,47	83,9	89,13	93,1	95,92	97,77

Таблиця 3

Дані прогнозованих температур на поверхнях шарів зовнішніх огорожуючих конструкцій, яке має дефекти

Значення температур на поверхнях шарів стіни	Товщина огороження, яка має дефект, мм		
	540	530	520
Температура на внутрішній поверхні стіни, $t'_{в}, ^\circ\text{C}$	13,68	13,58	13,49

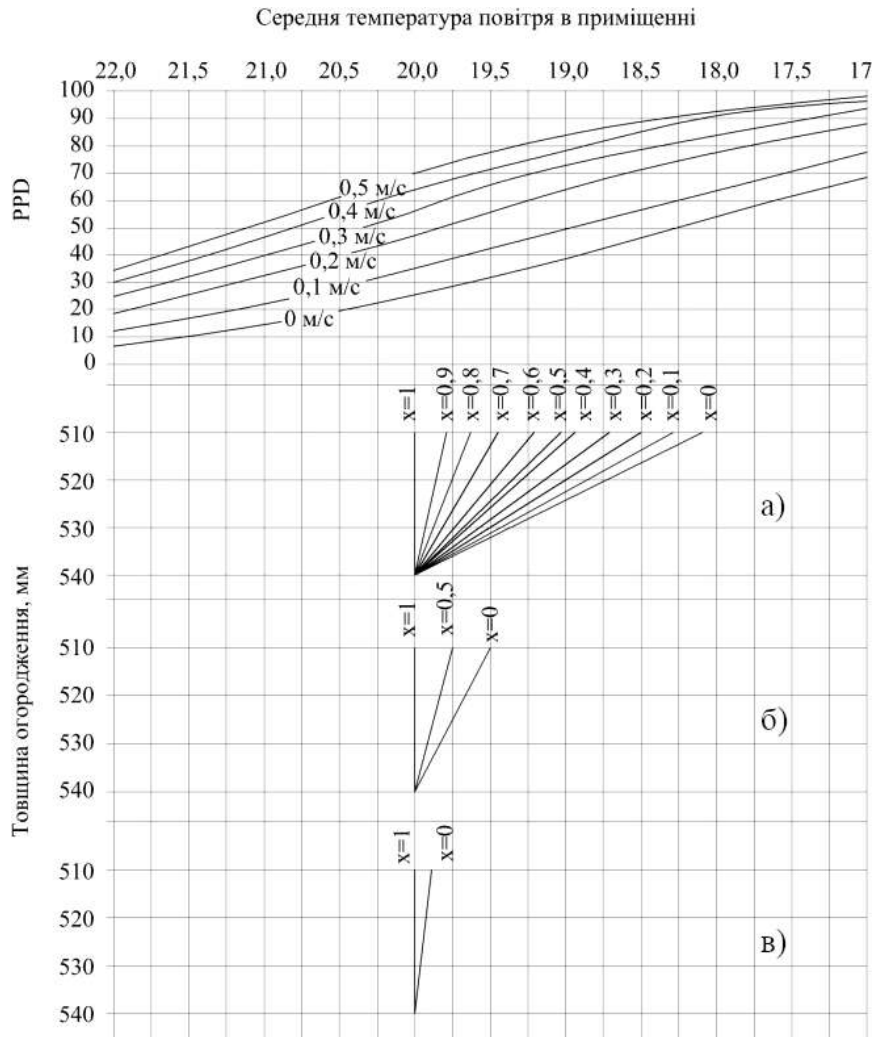


Рис. 2. Прогнозований відсоток незадоволених температурним середовищем (PPD) в залежності від ступеня дефекту зовнішньої огорожувальної конструкції:  
 а) за умови наявності дефектної зони тільки зовнішньої стіни [8];  
 б) за умови наявності дефектної зони зовнішньої стіни з вбудованим в нього вікном [11];  
 в) за умови наявності декількох різнотипових огорожувальних конструкцій та дефектної зони зовнішньої стіни з вбудованим в нього вікном [11]

**Висновки.** Отримані аналітичні дані свідчать, що в будівлі, яка має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій, можливо виникнення дискомфортних умов параметрів мікроклімату, які впливають на тіло людини та його відчуття. Основні висновки та рекомендації полягають в наступному:

- розрахунковий метод [2, 3] можна використовувати для прогнозування та оцінки мікроклімату в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій, та його впливу на стан людини;
- дані розрахунків оцінки показників PMV,

PPD і PD вказують на можливість зниження теплового комфорту в приміщенні, яке має дефекти зовнішніх огорожувальних конструкцій;

- з отриманих даних прогнозування параметрів PMV, PPD видно, що при температурі внутрішнього повітря 20 °C і  $0 \text{ м/с} < v_{ar} < 0,5 \text{ м/с}$  за відчуттями людини приміщення відноситься до класу С, а поява і збільшення дефектів тільки посилює ці відчуття. За параметром PD, хоча ми і отримуємо клас А, при комплексній оцінці параметр зводиться до показника найнижчого класу.

### Література

1. Fanger P. O. et al. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering // Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. – 1970.
2. EN ISO 7730:2005, IDT. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
3. DSTU B EN ISO 7730:2011 Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
4. JOOSSTENS F., ITARD L. Building Management for a Good Indoor Climate and Low Energy Use.
5. Application of PMV and PPD indices to predict how metro passengers evaluate the grade of thermal comfort or discomfort in different temperature conditions / Leskin A. G, Evlampieva M N., Mineeva N. I., Timoshenkova E. V. // *Gigiena i sanitarija*. – 2014. – Т. 93. – №. 3.
6. Моделирование и оптимизация микроклиматических условий и параметров систем жизнеобеспечения помещений / А. С. Беликов, С. З. Полищук, А. О. Петренко и др.; под ред. С. З. Полищук. – Днепропетровск: ЧМП «Экономика», 2013. – 176 с.
7. Микроклимат в помещениях с локальными тепловыделениями / И. В. Голякова, В. О. Петренко, С. З. Полищук и др.; под ред. С. З. Полищук. – Днепропетровск, 2016. – 120 с.
8. Estimation of indoor temperatures on condition that building envelope is damaged / Petrenko V., Dikarev K., Volchok D., Kuzmenko O. // *Revista Romana de Inginerie Civila*. – 2017. – Т. 8. – №. 1. – С. 36.
9. Петренко В. О. Факторы влияющие на микроклимат в помещении, которое имеет дефекты ограждающих конструкций и систем ОВК / В. О. Петренко, А. О. Петренко, И. В. Голякова // *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. науч. трудов / Днепр: ГБУЗ «ПГАСА», – 2016. – Вип. 93. – с. 286-291.
10. Indices of thermal comfort / Sulin A.B. et al. // St-Petersburg.: ITMO University. – 2016. – 36 p.
11. Evaluation of indoor temperature for various building envelopes damaged / Petrenko V., Dikarev K., Volchok D., Kuzmenko O. // *In E3S Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 32. – p. 01019.
12. Schumacher R., W. A. M. Wortel, P. A. Wieringa. Human factors in thermal indoor climate and thermal comfort // *Conference on human decision making and manual control, Lyngby, June 25-27, 2001*. – Orsted DTU, Automation. – 2001.
13. Прогнозування температури внутрішнього повітря в приміщеннях з дефектами зовнішніх огорожувальних конструкцій / В. О. Петренко, А. О. Петренко, І. В. Голякова, В. В. Петренко // *Енергетика, екологія, комп'ютерні технології, безпека життєдіяльності в будівництві*. – Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА». – 2018. – с. 70-78.

### References

1. Fanger P. O. et al. "Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering." *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, 1970.
2. EN ISO 7730:2005, IDT Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
3. DSTU B EN ISO 7730:2011 Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
4. JOOSSTENS F., ITARD L. Building Management for a Good Indoor Climate and Low Energy Use.
5. Leksin A. G. i dr. "Application of PMV and PPD indices to predict how metro passengers evaluate the grade of thermal comfort or discomfort in different temperature conditions." *Gigiena i sanitarija*, vol. 93, no. 3, 2014.
6. Belikov A. S. et al. *Modelling and optimization of micro-climatic conditions and parameters of the life support systems of buildings*. Dnipropetrovs'k, Ekonomika Publ, 2013.
7. Golyakova I. V. et al. *Microclimate in premises with local heat dissipations*. Dnipropetrovs'k, PSASeA, 2016.
8. Petrenko, V., Dikarev, K., Volchok, D., & Kuzmenko, O. "Estimation of indoor temperatures on condition that building envelope is damaged." *Revista Romana de Inginerie Civila*, vol. 8, no. 1, 2017.
9. Petrenko V. O., Petrenko A. O., Golyakova I. V. "Factors influencing the microclimate in the premises, which has a building faults and HVAC systems." *Stroytelstvo. Materyalovedenye. Mashynostroenyje. Seryia: Starodubovskye chtenyia*. no. 93, 2016, pp. 286–291.
10. Sulin A. B. et al. *Indices of thermal comfort*. ITMO University, 2016.
11. Petrenko, V., Dikarev, K., Volchok, D., Kuzmenko, O. "Evaluation of indoor temperature for various building envelopes damaged." *In E3S Web of Conferences*, vol. 32, p. 01019, 2018.
12. Schumacher, R., W. A. M. Wortel, and P. A. Wieringa. "Human factors in thermal indoor climate and thermal comfort." *Conference on human decision making and manual control, Lyngby, June 25-27, 2001*. Orsted DTU, Automation, 2001.
13. Petrenko V. O., Petrenko A. O., Golyakova I. V., Petrenko V. V. "Forecasting the temperature of the internal pollution in the areas affected by the defects in the ogoroduzhalnyh constructivities." *Power engineering, ecology, computer technologies, safety of life in building*, 2018.

УДК 628.8.02

## Оценка параметров микроклимата по показателям локального теплового комфорта в помещении, которое имеет дефекты наружных ограждающих конструкций

В. О. Петренко<sup>1</sup>, К. Б. Дикарев<sup>2</sup>, А. О. Петренко<sup>3</sup>, И. В. Голякова<sup>4</sup>, И. Ф. Огданский

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: petrenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4331-6844

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

<sup>3</sup>к.т.н., доц. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: petrenkoAO@ua.fm, ORCID ID: 0000-0002-0406-9852

<sup>4</sup>к.т.н., доц. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: miheyevaira@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7185-7202

<sup>5</sup>к.т.н., доц. Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [ivan.ogdanskyy@gmail.com](mailto:ivan.ogdanskyy@gmail.com)

*Аннотация. В статье решается задача оценки параметров микроклимата в помещении, которое имеет дефекты наружных ограждающих конструкций, по применению показателей теплового комфорта (Predicted Mean Vote – ожидаемая средняя оценка комфорта), PPD (Predicted Percentage Dissatisfied – прогнозируемый процент неудовлетворённых) и критериев локального теплового комфорта. Задачи исследования оценить параметры микроклимата в помещении, которое имеет дефекты наружных ограждающих конструкций, по показателям теплового комфорта PMV и PPD и критериям локального теплового комфорта; определить границы возможного снижения температуры внутреннего воздуха в помещении в зависимости от процента дефектной зоны внешней стены, двигательной активности человека и термического сопротивления одежды. В основе задачи оценки параметров микроклимата в помещении лежит расчётный метод для прогнозирования и оценки микроклимата в помещении и его влияния на состояние человека. Метод заключается в оценке температурных ощущений тела и связан с его тепловым балансом. Полученные в статье аналитические данные свидетельствуют, что в здании, которое имеет дефекты наружных ограждающих конструкций, возможно возникновение дискомфортных условий параметров микроклимата, которые влияют на тело человека и его ощущения. Расчётный метод можно использовать для прогнозирования и оценки микроклимата в помещении, которое имеет дефекты наружных ограждающих конструкций.*

*Ключевые слова: микроклимат, тепловой комфорт, PMV, PPD, дефектная зона; критерии локального теплового комфорта.*

UDC 628.8.02

## Evaluation of Microclimate Parameters by Indicators of Local Heat Comfort in the Room Which Has Failures of Outside Observing Structures

V. O. Petrenko<sup>1</sup>, K. B. Dikarev<sup>2</sup>, A. O. Petrenko<sup>3</sup>, I. V. Holiakova<sup>4</sup>, I. F. Ogdanskii<sup>5</sup>

<sup>1</sup> PhD, associate professor. State Higher Educational Institution "Dnieper State Academy of Construction and Architecture", Dnipro, Ukraine, petrenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4331-6844

<sup>2</sup> PhD, associate professor. State Higher Educational Institution "Dnieper State Academy of Construction and Architecture", Dnipro, Ukraine, kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

<sup>3</sup> PhD, associate professor. State Higher Educational Institution "Dnieper State Academy of Construction and Architecture", Dnipro, Ukraine, petrenkoAO@ua.fm, ORCID ID: 0000-0002-0406-9852

<sup>4</sup> PhD, associate professor. State Higher Educational Institution "Dnieper State Academy of Construction and Architecture", Dnipro, Ukraine, miheyevaira@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7185-7202

<sup>5</sup> PhD, associate professor. State Higher Educational Institution "Dnieper State Academy of Construction and Architecture", Dnipro, Ukraine, [ivan.ogdanskyy@gmail.com](mailto:ivan.ogdanskyy@gmail.com)

*Abstract. The article deals with the task of evaluating the parameters of the microclimate in the room, which has defects of external enclosing structures, using the indicators of thermal comfort PMV (Predicted Mean Vote), PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) and criteria of local thermal comfort. Objectives of the study is the evaluation of the influence of the parameters of the microclimate in the room, which has defects of external fencing structures on the indicators of thermal comfort PMV and PPD and criteria for local thermal comfort; determine the limits of a possible reduction of the temperature of the internal air in the room, depending on the percentage of defective zone of the outer wall, the moving activity of man and the thermal resistance of clothing. The basis of the task of evaluating the parameters of the microclimate in the room is the calculation method for predicting and evaluating the microclimate in the room and its impact on the human condition. The method is based on the temperature sensations of the body and its thermal balance. The analytical data obtained in the article show that in a building that has defects in external fencing structures it is possible to obtain uncomfortable conditions of microclimate parameters, which affect the human body and its senses. From the data obtained by forecasting the parameters PMV, PPD it is seen that at internal air temperature of 20 °C and internal velocity in the range 0...0.5 m/s, for the senses of a person, the room belongs to class C, and the appearance and increase of defects only enhances these feelings. By parameter PD, although we get it in class A. But complex evaluation shows that the parameter is reduced to the lowest class. The calculation method can be used to predict and evaluate the microclimate in a room that has defects in external enclosing structures.*

*Keywords: microclimate, thermal comfort, PMV (The predicted mean vote), PPD (The predicted percentage dissatisfied), defective area; criteria for local thermal comfort.*

Надійшла до редакції / Received 29.08.2018

УДК 697.34

## Оптимизация параметров тепловой сети при пониженном температурном графике

И. А. Редько<sup>1</sup>, А. А. Редько<sup>2</sup>, А. В. Приймак<sup>3</sup>, А. Ф. Редько<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Харьковский национальный университет городского хозяйства им А.Н. Бекетова, г. Харьков, Украина, [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net), ORCID:0000-0002-9863-4487

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, [andrey.ua-mail@ukr.net](mailto:andrey.ua-mail@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2331-7273

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [02opriymak@gmail.com](mailto:02opriymak@gmail.com)

<sup>4</sup>д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, [redko.af@gmail.com](mailto:redko.af@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8226-7961

*Аннотация. Экономические и экологические проблемы Украины приводят к снижению температуры воды в системах теплоснабжения. Повышение стоимости топлива сделало нецелесообразным температурный график 95/70. Для перехода на пониженный температурный график в первую очередь необходимо обеспечить автоматизацию регулирования индивидуальных тепловых пунктов. Лишь после этого возможно применение сниженных температурных графиков. Это подтверждается успешным опытом стран, где широко используется центральное теплоснабжение: Дания, Германия, Финляндия, Швеция, Голландия и др. Модернизация систем теплоснабжения Украины должна идти путём перехода на независимые системы отопления с качественно-количественным регулированием, после чего температурный график может быть снижен до целесообразных значений. Проведено численное исследование оптимальной температуры и расхода воды в тепловой сети в зависимости от конструктивных и режимных параметров. Также использовались результаты натурных исследований отопительной характеристики жилых домов и административных зданий, теплоснабжение которых осуществляется от двух крупных источников г. Харькова. Численно определено производство энтропии в системе теплоснабжения в зависимости от конструктивных и режимных параметров. В результате вычислительного эксперимента при использовании производства энтропии в качестве критерия оптимизации определены и обоснованы параметры пониженного температурного графика системы теплоснабжения для условий г. Харькова.*

*Ключевые слова: тепловая сеть, пониженный температурный график, численное исследование, оптимизация.*

**Введение.** Обоснование оптимальных параметров теплового графика системы теплоснабжения производится на основе технико-экономических расчётов. Основными факторами, влияющими на выбор параметров, системы теплоснабжения являются, затраты на строительство теплогенераторов, тепловых сетей и теплопотребляющего оборудования, стоимость топлива и электроэнергии, тепловые потери трубопроводов и энергетические затраты на транспорт теплоносителя. В связи с модернизацией систем теплоснабжения возникает проблема обоснования параметров графика центрального регулирования отпуска тепловой энергии, и перехода от качественного метода регулирования отпуска теплоты к качественно-количественному.

Опыт внедрения показывает, что приведенные затраты на 40-50% меньше, чем при качественном регулировании. Совмещение качественного и количественного регулирования позволяет снизить теплопотребление в переходные периоды отопительного сезона до 50% [1, 2]. В системах теплоснабжения с источником теплоты от ТЭЦ необходимо учитывать

факторы определяющие эффективность работы теплогенерирующих установок.

**Состояние проблемы.** Результаты [10, 13] указывают на необходимость корректировки температуры сетевой воды в зависимости от тепловой нагрузки, температуры наружного воздуха, времени суток, т.е. создания динамических температурных графиков. Температурные графики должны составляться индивидуально для каждой СЦТ, и только при этом наблюдается системная экономия расхода топлива. В [11] указывается, что понижение температуры сетевой воды после системы отопления, запроектированной на график 95/70°C не реально без технической модернизации, материалов и финансовых затрат. Снижение температуры прямой сетевой воды при одновременном увеличении ее расхода стало возможным вследствие значительного снижения тепловой нагрузки источников и тепловых магистралей. В [14] приведены данные натурных испытаний режимов СЦТ (г. Витебск). Выполнено сравнение энергозатрат при различных температурных графиках отпуска теплоты в межотопительный период. Установлено, что энергопо-

ребление снижается при режиме теплоснабжения 75/55°C до ЦТП (ИТП). Опыт внедрения количественного регулирования показывает, что приведенные затраты на 40-50% меньше, чем при качественном регулировании.

Технические возможности потребителей позволяют иметь достаточно низкие температуры обратной сетевой воды, что позволяет сохранить или даже увеличить перепад температуры ( $t_{np} - t_{обp}$ ). Так, температурный график 130/70°C может быть заменен на график 100/40°C при том же расходе сетевой воды [3]. В работе [15] приведены результаты оптимизации параметров пониженного температурного графика при оптимизации затрат на транспорт теплоносителя. Пониженный температурный график возможен за счет снижения мощности систем вентиляции воздуха помещений при расчетном расходе сетевой воды [16]. Показано, что возможно снижение температуры прямой сетевой воды от 150°C до 115°C за счет снижения общей тепловой мощности системы отопления до 0,706 от проектного значения.

Факторы, влияющие на выбор температурного графика: температура наружного воздуха, пропускная способность тепловых сетей, нагрузка ГВС, нагрузка на вентиляцию, нагрузка на отопление: потери через ограждающие конструкции, кратность воздухообмена [7, 8, 25]. Нормативные документы, влияющие на выбор температурного графика: ДБН В.2.2 – 15:2015, ДСТУ Б EN 12831, ДБН В.2.5 – 39:2008, ДБН В.2.5 – 67:2013, ДСТУ Б EN 15251: 2011, ДСТУ Б EN ISO 7730. Кратность воздухообмена согласно с ДБН В.2.5 – 67:2013 в Украине 0,5. Для сравнения: в США – 0,35; Германии – 0,5; Англии – 0,4; Швеции – 0,2. Нормативное снижение кратности воздухообмена в 2,4 раза обеспечивает снижение проектной тепловой нагрузки на 30-35% [4] и позволяет обосновать замену температурного графика 150/70 °C на 115/70 °C. В странах Дания, Финляндия, Швеция, Норвегия реализуется температурный график в первичном контуре 120 °C/(от 50 °C до 70 °C) [17-21, 30-32]. Международные стандарты систем централизованного теплоснабжения приведены в

таблице 1. Пределы эффективности использования технологии пониженного температурного графика приведены в таблице 2.

**Цель работы.** Целью работы является оптимизация параметров температурного режима тепловой сети с применением в качестве критериев минимальное производство энтропии в системе и минимальные затраты энергии на транспорт теплоносителя.

**Методика исследования.** Выбор оптимального расхода теплоносителя зависит от диаметра трубопровода, толщины и свойств тепловой изоляции, температуры сетевой воды [23, 34]. Поэтому при определении температуры теплоносителя необходимо учитывать потери энергии при транспорте и тепловые потери в окружающую среду.

Для изолированной системы теплоснабжения производство энтропии определяется скоростью её изменения:

$$\frac{ds}{dt} = \sum \frac{q_i}{T_i} + \delta, \text{ Вт/К} \quad (1)$$

где  $q_i$ ,  $T_i$ ,  $\delta$  соответственно плотность потока теплоты с температурой  $T_i$ , производство энтропии.

Изменение энтропии в системе теплоснабжения, согласно [33]:

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_Q + \Delta S_{\Delta p}, \text{ Вт/К}. \quad (2)$$

Изменение энтропии при теплообмене теплоносителя с окружающей средой:

$$\Delta S_Q = q_{\ell} \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T'_w} \right), \text{ Вт/К}, \quad (3)$$

где  $T_o$  – температура окружающей среды;  $T'_w$  – температура воды в подаваемом трубопроводе;  $q_{\ell}$  – линейная плотность теплового потока.

Изменение энтропии при учёте трения движения теплоносителя:

Стандарты температуры теплоносителя (Финляндия)

Система теплоснабжения	Новые здания		Старые здания	
	Отопление	ГВС	Отопление	ГВС
Первичный контур	115/45	70/25	115/65	70/25
Вторичный контур	70/40	55/10	80/60	55/10

Таблица 1



Температурные графики систем централизованного теплоснабжения (Голландия) Нидерланды

Название системы	Температура в прямом трубопроводе, °С	Температура в обратном трубопроводе, °С
Высокотемпературное теплоснабжение	90	70
Среднетемпературное теплоснабжение	55	35-40
Низкотемпературное теплоснабжение	45	25-35
Сверхнизкотемпературное теплоснабжение	35	25

$$\Delta S_{\Delta p} = m_b \Delta p / (\delta_b \cdot T'_w) \quad (4)$$

Оптимизация параметров тепловой сети выполнялась по целевым функциям с учётом стоимости электроэнергии и теплоты:

$$P_{\Sigma} = P_{эл} C_{эл} + q_{\ell} C_q \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_{\Delta p} C_{эл} + \Delta S_Q C_q \rightarrow \min. \quad (6)$$

Решение уравнений (5) и (6) выполняли с применением математического планирования эксперимента в зависимости от следующих факторов: диаметра и толщины тепловой изоляции трубопровода. В результате решения задачи определяли температуру теплоносителя в падающем и обратном трубопроводе, расход теплоносителя при минимальных удельных потерях энергии для различных значений температуры наружного воздуха (г. Харьков).

**Анализ результатов.** В работе приведены результаты моделирования системы теплоснабжения, проложенной в подземном канале; глубина заложения канала – 1 м, поперечное сечение канала – 0,25 м<sup>2</sup>. Коэффициент теплопроводности стенок канала принят 1,3 Вт/(м·К). Определено существенное влияние теплотехнической характеристики на значения температуры сетевой воды в подаваемом трубопроводе. В табл. 3 приведены данные расчёта теплового и гидравлического режимов при различных значениях КФ. Отмечено, что пониженные параметры системы теплоснабжения, обеспечиваются при увеличении значения отопительной характеристики (КФ).

Расчётные данные, приведенные в табл. 3, указывают, что пониженный температурный

график может быть применён при высоком значении дополнительной характеристики (КФ = 10-14) и постоянном расходе теплоносителя  $m_b$ . Фактические данные, приведенные в табл. 4, указывают, что значение КФ для жилых домов составляет 4 – 5,8 кВт/к. При этом в жилых домах обеспечиваются комфортные условия.

Значение отопительной характеристики (КФ) определялось также по данным натурных измерений для двух источников теплоснабжения г. Харькова: филиал КП «Харьковские тепловые сети. ТЭЦ – 3», вырабатывающий 1353 Гкал/час и ПАО «ТЭЦ – 5», вырабатывающий 1420 Гкал/час. Установленная мощность ТЭЦ-5 составляет 540 МВт, ТЭЦ-3 – 86 МВт. Суммарная вырабатываемая мощность двух источников составляет более 50 % потребляемой теплоты для города с населением свыше 1,5 млн. жителей.

Результаты измерений для ТЭЦ-3 и ТЭЦ-5 приведены на рис. 1 и 2. Измерения показывают, что значения отопительной характеристики составляет (4,4 – 5,2 кВт/к).

Зависимость производства энтропии в системе теплоснабжения от конструктивных параметров (диаметр трубопровода и толщина тепловой изоляции) и параметры теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах показаны на рис. 3 и 4.

На рис. 5 показана зависимость температуры теплоносителя от тепловой нагрузки.

Натурные измерения энергетических характеристик жилых домов (г. Харьков), выполнены в 2015-2016 годах. Результаты показали, что их значения превышают нормативные (табл. 4), рекомендуемые ДБН В.2.6 – 31:2016, на 35 – 75.3%.

Таким образом, применение пониженного температурного графика в системах теплоснабжения потребует снижения энергопотребления

в жилых домах и административных зданиях.

**Выводы.** Результаты вычислительного эксперимента позволили определить рациональные конструктивные и режимные параметры СЦТ при различных значениях температуры теплоносителя. Результаты численного исследования показывают, что параметры тепловой сети при максимальной тепловой нагрузке и температуре наружного воздуха (-25°C) следующие: температура сетевой воды в подающем трубопроводе равна 76,7°C; расход теплоносителя 5,7 кг/с, скорость 0,73 м/с, удельные потери давления 85,3 Па/м, удельные потери элек-

трической мощности на транспорт теплоносителя 0,81 Вт/м, удельные тепловые потери 33,8 Вт/м.

**Перспективы дальнейших исследований.**

На теперешний час в связи со стремительным ростом и развитием городов, строительством жилищных комплексов, возникает необходимость в усовершенствовании систем теплоснабжения, модернизации и автоматизации оборудования индивидуальных тепловых пунктов, что и определяет актуальность и перспективность дальнейших исследований.

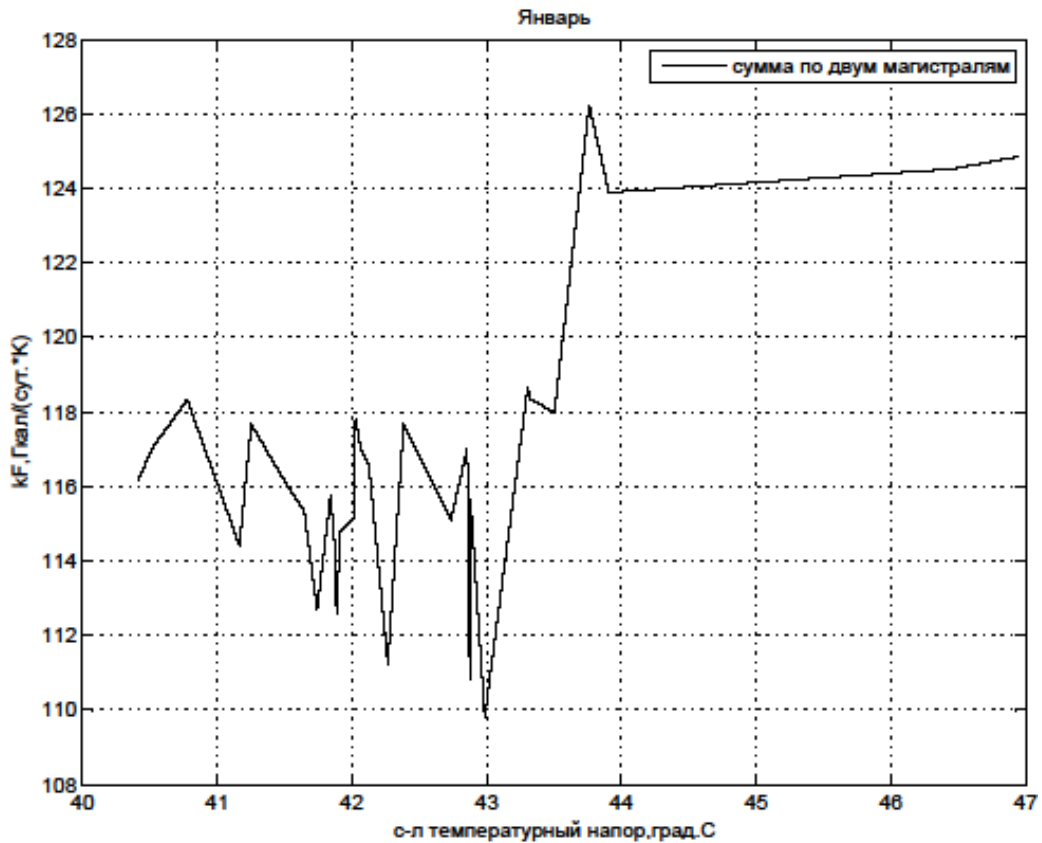


Рис. 1. Значение отопительной характеристики для источника теплоснабжения ТЭЦ – 5 при среднелогарифмическом (с-л) температурном напоре

$$\Delta t = (t_{np} - t_{обp}) / \ln((t_{np} - t_o) / (t_{обp} - t_o))$$

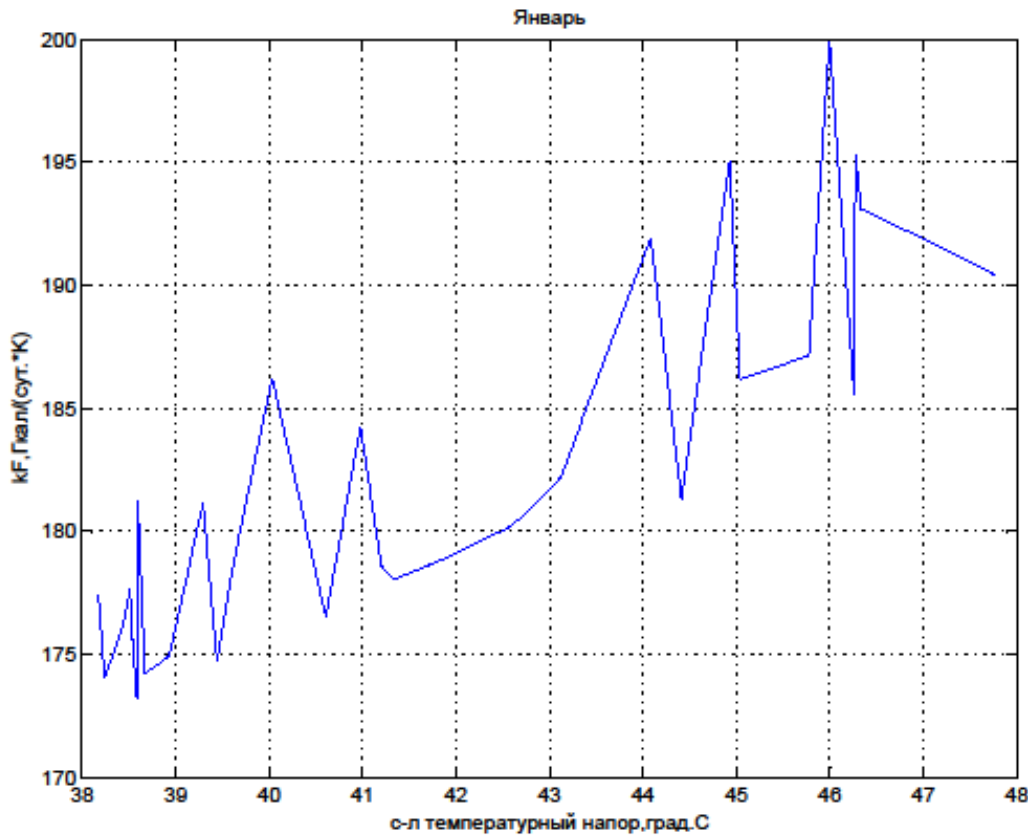


Рис. 2. Значение отопительной характеристики для источника теплоснабжения ТЭЦ – 3.

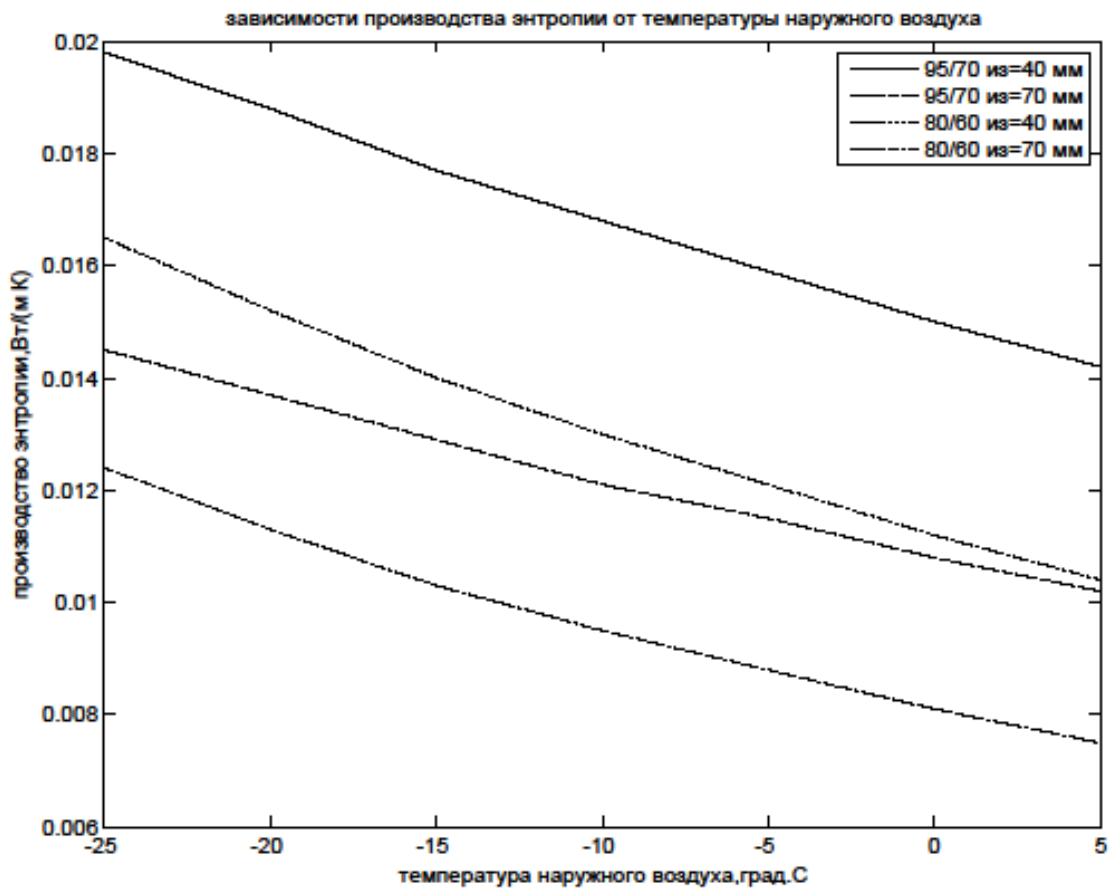


Рис. 3. Зависимости производства энтропии от температуры наружного воздуха и температуры теплоносителя.

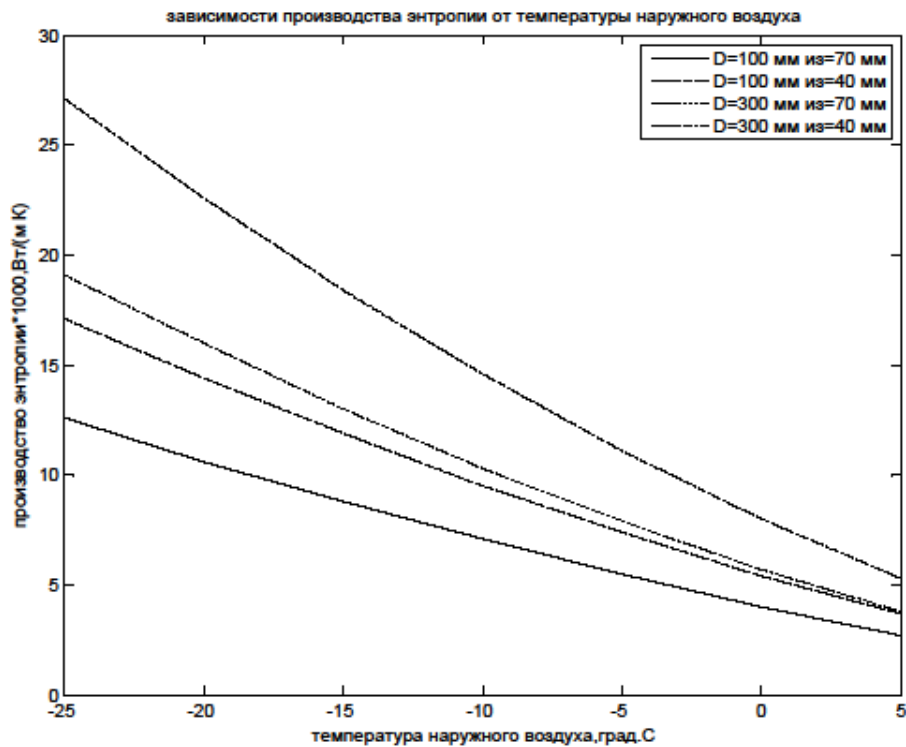


Рис. 4. Зависимости производства энтропии от температуры наружного воздуха и конструктивных параметров.

Таблица 3

Результаты численного эксперимента

№ опыта	$t_{нар}, °C$	$D_{вн}, мм$	$D_{нар}, мм$	$\delta_{из}, мм$	$t_{пр}, °C$	$t_{обр}, °C$	$G_m, кг/с$	$w, м/с$	$\Delta p, Па/м$	$P_{эл}, Вт/м$	$q_{\ell}, Вт/м$	$\Delta S_1 \cdot 10^3, Вт/(м \cdot K)$	$\Delta S_2 \cdot 10^3, Вт/(м \cdot K)$	$\Delta S_e = (c w \Delta S_1 + c q \Delta S_2) \cdot 10^3, Вт/(м \cdot K)$
1	-25	300	308	70	75,0	69,7	28,5	0,40	6,6	0,31	66,4	0,54	52,3	19,1
2	-20	300	308	70	69,0	64,1	27,1	0,38	6,0	0,27	59,1	0,47	43,6	16,0
3	-15	300	308	70	63,0	58,5	25,5	0,36	5,3	0,23	51,8	0,40	35,5	13,0
4	-10	300	308	70	57,0	52,8	23,9	0,34	4,6	0,18	44,5	0,33	28,1	10,3
5	-5	300	308	70	51,0	47,2	22,1	0,31	4,0	0,15	37,2	0,27	21,4	7,9
6	0	300	308	70	45,0	41,6	20,1	0,28	3,3	0,11	29,8	0,21	15,4	5,7
7	5	300	308	70	38,9	36,1	17,8	0,25	2,6	0,08	22,5	0,15	10,3	3,8
8	-25	300	308	40	74,8	70,0	31,1	0,44	7,9	0,41	94,3	0,70	74,2	27,1
9	-20	300	308	40	68,8	64,3	29,5	0,42	7,1	0,35	83,9	0,60	61,8	22,6
10	-15	300	308	40	62,8	58,6	27,8	0,39	6,3	0,29	73,5	0,52	50,3	18,4
11	-10	300	308	40	56,8	53,0	26,0	0,37	5,5	0,24	63,2	0,44	39,8	14,6
12	-5	300	308	40	50,8	47,4	24,1	0,34	4,7	0,19	52,8	0,35	30,3	11,1
13	0	300	308	40	44,8	41,8	21,9	0,31	3,9	0,14	42,3	0,27	21,8	8,0
14	5	300	308	40	38,8	36,2	19,4	0,27	3,1	0,10	31,9	0,19	14,5	5,3
15	-25	100	108	70	85,8	60,8	6,0	0,76	92,9	0,92	36,9	1,5	32,3	12,6
16	-20	100	108	70	79,2	55,8	5,7	0,72	84,2	0,80	33,0	1,4	27,1	10,6
17	-15	100	108	70	72,5	50,8	5,4	0,68	75,3	0,67	29,1	1,2	22,3	8,8
18	-10	100	108	70	65,7	45,9	5,0	0,64	66,3	0,56	25,2	1,0	17,9	7,1
19	-5	100	108	70	58,8	41,1	4,7	0,60	57,1	0,45	21,2	0,8	13,8	5,5
20	0	100	108	70	51,9	36,3	4,3	0,54	47,7	0,34	17,2	0,6	10,1	4,0
21	5	100	108	70	44,8	31,7	3,8	0,49	38,0	0,24	13,2	0,5	6,8	2,7
22	-25	100	108	40	84,8	61,6	6,5	0,82	108,6	1,17	50,8	2,0	44,0	17,1
23	-20	100	108	40	78,2	56,5	6,1	0,78	98,4	1,0	45,4	1,7	37,0	14,4
24	-15	100	108	40	71,5	51,5	5,8	0,74	88,0	0,85	40,0	1,5	30,4	11,9
25	-10	100	108	40	64,8	46,5	5,5	0,69	77,4	0,70	34,6	1,2	24,3	9,5
26	-5	100	108	40	58,1	41,6	5,1	0,64	66,6	0,56	29,2	1,0	18,7	7,4
27	0	100	108	40	51,2	36,8	4,6	0,59	55,6	0,43	23,7	0,8	13,7	5,4
28	5	100	108	40	44,2	32,1	4,1	0,52	44,2	0,30	18,1	0,6	9,2	3,7

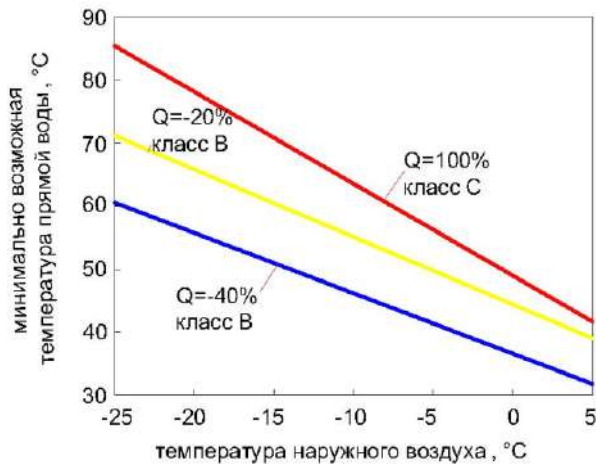


Рис. 5. Температура теплоносія при різній тепловій навантаженні

Таблиця 4.

Енергетичні характеристики житлових будинків

Етажність житлових будинків/отапливана площа, м <sup>2</sup>	Нормативні значення, кВт/м <sup>2</sup>	Фактичні значення, кВт/м <sup>2</sup>
5-ти ет. житловий будинок/ 3087	89	117
9-ти ет. житловий будинок/ 7869	73	112.7
16-ти ет. житловий будинок/ 3656	73	128

### Література

1. Басок Б. І. Перспективи розвитку сфери теплозабезпечення населених пунктів України / Б. І. Басок, О. М. Недбайло // Енергоефективність в будівництві та архітектурі : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва та архітектури. – 2017. – Вип. 9. – с. 31-37.
2. Шарапов В. І. Регулювання навантаження систем теплоснабження / В. І. Шарапов, П. В. Ротов. – Москва: Издательство "Новости теплоснабжения", 2007. – 164 с.
3. Стенников В. А. Методи комплексного преобразования систем централизованного теплоснабжения в новых экономических условиях: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.14.01 / В. А. Стенников; Сибирское отделение Российской академии наук, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева. – Иркутск, 2002. – 50 с.
4. Сафьянц А. С. Анализ температурного графика работы тепловых сетей г. Киева и предложения по его оптимизации / XXVI міжнародна конференція «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики». 20 по 24 вересня 2016 р. в м. Одеса: доповідь. – Режим доступу: <http://engecology.com/konferencii/konferenci%D1%97-2016/>
5. Дорошенко Ж. Ф. О целесообразности использования пониженного графика работы ЦСТ муниципальных систем теплоснабжения [Электронный ресурс] / Ж. Ф. Дорошенко, Г. И. Ковальчук, М. Д. Потапов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: тезисы докладов XXV международной научно-практической конференции MicroCAD-2017, 17-19 мая 2017 г.: в 4 ч. Ч. III. – Харьков: НТУ ХПИ, 2017. с. 23. – Режим доступу: [http://pim.net.ua/arch\\_f/tez\\_mic\\_17\\_III.pdf](http://pim.net.ua/arch_f/tez_mic_17_III.pdf)
6. Парасочка С. О. До питання температурних графіків відпуску теплової енергії традиційними системами ЦТ [Электронный ресурс] / С. О. Парасочка // ПП НВЦ «Теплокомплект». Режим доступу: <http://www.tecom.com.ua/work/publications/75/tempgraf.pds>.
7. Кувшинов Ю. Я. Основы обеспечения микроклимата зданий / Ю. Я. Кувшинов, О. Д. Самарин. – Москва: Издательство «АСВ», 2012. – 200 с.
8. Самарин О. Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность / О. Д. Самарин. – Москва: Издательство «АСВ», 2011. – 297 с.
9. Шарапов В. И. Технологии обеспечения пиковых нагрузок систем теплоснабжения / В. И. Шарапов, М. Е. Орлов. – Москва: Издательство "Новости теплоснабжения", 2006. – 208 с.
10. Седнин В. А. Оптимизация параметров температурного графика отпуска теплоты в теплофикационных системах / В. А. Седнин, А. В. Седнин, М. Л. Богданович // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика: научно-технический и производственный журнал. – 2009. – № 4. – с. 55-62.
11. Яковлев, Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14 / Б. В. Яковлев; кол. авт. Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2004. – 40 с.
12. Малая Э. М. Теплоснабжение от тепловых сетей ТЭЦ и (роторных) котельных с оптимизацией параметров / Э. М. Малая. – Саратов: Политехнический Институт, 1983. – 48 с.
13. Седнин В. А. Теория и практика создания автоматизированных систем управления теплоснабжением / В. А. Седнин. – Минск: БНТУ, 2005. – 136 с.
14. Черковский Н. М. Оптимизация температурного графика отпуска тепла в межотопительный период / Н. М. Черковский // Энергия и менеджмент. – 2002. – №2. – с. 10-14.

15. Панферов В. И., Гавей О. Ф. Об оптимальном управлении температурой теплоносителя в тепловых сетях / В. И. Панферов, О. Ф. Гавей // Вестник ЮУрГУ, сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – №4. – т. 14. – с. 65-70
16. Петрущенко В. А. Обоснование пониженного температурного графика регулирования центральных систем теплоснабжения / В. А. Петрущенко // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 8 (180). – с. 30-37.
17. Кролин А. Эффективное теплоснабжение: датский опыт [Электронный ресурс] / А. Кролин // ЭнергоРынок. – 2005. – № 4. – Режим доступа: <http://www.e-m.ru/er/2005-04/22708/>
18. Рыкалов В. Централизованное теплоснабжение в Дании и Германии. Режим доступа, [электронный ресурс]: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id)
19. Пекка Коури. Централизованное теплоснабжение в Финляндии / Пекка Коури // Информ. Бюл. ППВ ЖФ. – 1998. – №5.
20. Гашо Е. Г. О некоторых способах повышения эффективности теплоснабжения: регулирование и автономное отопление / Е. Г. Гашо, В. П. Кожевников // Новости теплоснабжения. – 2007. – №2. – с. 17-22.
21. Loppenhien J.K. Temperature Optimization – Horning District Heating Company has achieved remarkable results / J.K. Loppenhien, P. Jensen // *Holtcool*. – 2008. – №1. – pp. 14-15.
22. Давыдов А.Н. Анализ практики применения пониженных температурных графиков в теплоснабжении в зарубежных странах и оценка перспектив использования в системах теплоснабжения, включающих источники комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, режимов с пониженными температурными графиками в целях повышения энергоэффективности и качества предоставляемых услуг по теплоснабжению: Отчет НИР [Электронный ресурс] / А.Н. Давыдов. – Москва. – 2014. – 170 с. – Режим доступа: <http://gokurce.ru/tinybrowser/files/doc/metodika-o-ponizhenii-temperatury.docx>
23. Каганович Б. М. Равновесное термодинамическое моделирование диссипативных макроскопических систем / Б. М. Каганович, А. В. Кейко. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. – 76 с.
24. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для ВУЗов / Е.Я. Соколов // изд-во МЭИ, 1999. – 472 с.
25. Вагин Н. И. Системы вентиляции жилых помещений многоквартирных домов / Н. И. Вагин, Т. В. Самопляс. – СанктПетербург, 2004. – 66 с.
26. Лобатовкина Е.Г., Серов А.Д., Методика расчёта теплотехнических и энергетических параметров здания и заполнение формы энергетического паспорта / Е.Г. Лобатовкина, А.Д. Серов // М. МГСУ, 2015. – 57 с.
27. Матросов Ю. А. Новые государственные нормы Украины «Тепловая изоляция зданий» / Ю. А. Матросов, Г. Г. Фаренюк // *Жилищное строительство*. – 2007. – №11. – с 8-12.
28. ДБН В.2.6-31-2016. Теплова ізоляція будівель. – Чинні від 01.04.2017. – Київ: Укрархбудінформ, 2017. – 35 с.
29. Зингер Н. И. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. – Москва: Энергоатом, 1986. – 320с.
30. 4-th Generation District Heating (4GDH) Integrating Smart Thermal grids into Future sustainable energy systems / Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, Brian Vad Mathiesen // *Energy*. – 2014. – no. 68. – pp. 1-11.
31. Connolly D. Heat Roadmap Europe: second pre-study for the EU27 / D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Ostergaard, B. Möller, S. Nielsen, H. Lund, ... D. Trier. – 2013. – 236 p.
32. Пузаков В. С. Теплоснабжение по-европейски / В. С. Пузаков // *Новости теплоснабжения*. – 2008. – №8(96). – С. 18-23.
33. Bejan A. Entropy Generation Minimization / A. Bejan. – CRC Press, 1996. – 362 p.
34. Параметры тепловой сети при пониженном температурном графике // Редько И. А., Редько А. А., Приймак А. В., Ланцберг Н. Г. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. – 2018. – вип. 24. – с. 42-51.

#### References

1. Basok B. I., Nedbailo O. M. “Perspektyvy rozvytku sfery teplozabezpechennia naselennykh punktiv v Ukraini.” *Energoefektivnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, no. 9, 2017, pp. 31-37.
2. Sharapov V. I., Rotov P. V. *Regulirovanie zagruzki sistem teplosnabzheniia*, Izdatelstvo Novosti teplosnabzheniia, 2007.
3. Stennikov V. A. *Metody kompleksnogo preobrazovaniya sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya v novykh ekonomicheskikh usloviyakh*. Diss. abstract. The L.A.Melentiev Institute of Energy Systems, 2002.
4. Safiants A. S. “Analiz temperaturnogo grafika raboty teplovykh setei g. Kieva i predlozheniia po ego optimizatsii.” *XXVI mizhnarodna konferentsiia «Problemy ekolohii i ekspluatatsii obektiv enerhetyky»*, 20 - 24 veresnia 2016, m. Odesa: *dopovid*, <http://engecology.com/konferencii/konferenci%D1%97-2016/>
5. Doroshenko Zh.F., Kovalchuk G. I., Potapov M. D. “Okazaniye uslug po vnedreniyu i vnedreniyu mikro-skhem.” *Informatyvni tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorobia: tezy dopovidei XXV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2017, 17-19 travnia 2017*, vol. III. pp. 23, [http://pim.net.ua/arch\\_f/tez\\_mic\\_17\\_III.pdf](http://pim.net.ua/arch_f/tez_mic_17_III.pdf)

6. Parasochka S.O. "Do pytannya temperaturnykh grafikiv vidpusku teplovoi energii tradytsiinymy systemamy TST" *PP NVTS «Teplokomplekt»*, <http://www.tecom.com.ua/Work/publications/75/tempgraf.pds>.
7. Kuvshinov Yu.Ya., Samarin O. D. *Osnovy obespecheniia mikroklimata zdaniy*. Izdatelstvo «ASV», 2012.
8. Samarin O. D. *Teplofizika. Energoberezhenie. Energoeffektivnost*. Izdatelstvo «ASV», 2011.
9. Sharapov V. I., Orlov M. E. *Tekhnologii obespecheniia pikovoi nagruzki sistem teplosnabzheniia*. Izdatelstvo "Novosti teplosnabzheniia", 2006.
10. Sednin V. A., Sednin A. V., Bogdanovich M. L. "Optimizatsiya parametrov temperaturnogo grafika otpuska teploty v teplofikatsionnykh sistemakh." *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh obedinenii SNG Energetika*, № 4, 2009.
11. Yakovlev B. V. *Povysheniye effektivnosti sistem teplofikatsii i teplosnabzheniya*: Diss. abstract. Belarusian National Technical University, 2004.
12. Malaya E. M. *Teplosnabzhenie ot teplovykh setey TETS i (rotornykh) kotelnykh s optimizatsiei*. Politekhnikeskii Institut, 1983.
13. Sednin V. A. *Teoriya i praktika sozdaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya teplosnabzheniyem*. BNTU, 2005.
14. Cherkovskiy N. M. "Optimizatsiya temperaturnogo grafika otpuska tepla v mezhotopitel'nyy period." *Energiya i menedzhment*, No.2, 2002.
15. Panferov V. I., Gavei O. F. "Ob optimalnom upravlenii temperaturoi teplonositel'ia v teplovykh setiakh." *Vestnik YUUrGU, ser. Kompiuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, vol. 14, no. 4, 2014, pp. 65 – 70.
16. Petrushchenkov V. A. "Obosnovanie ponizhennogo temperaturnogo grafika regulirovaniia tsentralnykh sistem teplosnabzheniia." *Novosti teplosnabzheniya*, no. 6 (180), 2015.
17. Krolin A. "Effektivnoe teplosnabzheniye: datskii opyt." *Energorynok*, no. 4, 2005, [http://www.e.m.ru/er/2005\\_04/22708/](http://www.e.m.ru/er/2005_04/22708/).
18. Rykalov V. Tsentralizovannoe teplosnabzheniye v Danyy y Hermanyy. Rezhym dostupa, [elektronnyy resurs]: <http://sintur.ru/stat/453/>.
19. Pekka Kouri. "Tsentralizovannoe teplosnabzhenie v Finlyandii." *Inform. Byul. PPV ZHF*, no. 5, 1998.
20. Gasho Ye. G., Kozhevnikov V. P. "O nekotorykh sposobakh povysheniia effektivnosti teplosnabzheniia: regulirovaniie i avtonomnoe otoplenie." *Novosti teplosnabzheniia*, no. 2, 2007.
21. Loppenhien J.K., Jensen P. "Temperature Optimization – Horning District Heatind Company has achieved remarkable results." *Holtcool*, no. 1, 2008.
22. Davydov A. N. "Analiz praktiki primeneniia ponizhennykh temperaturnykh grafikov v teplosnabzhenii v zarubezhnykh stranakh i otsenka perspektiv ispolzovaniia v sistemakh teplosnabzheniia, vkluchaiushchikh istochniki kombinirovannoi vyrabotki elektricheskoi i teplovoi energii, rezhimov s ponizhennymi temperaturnymi grafikami v tseliakh povysheniia energoeffektivnosti i kachestva predostavliaemykh uslug po teplosnabzheniiu", <http://gokurce.ru/tinybrowser/files/doc/metodika-o-ponizhenii-temperatury.docx>
23. Kaganovich B. M., Keiko A. V., Shamanskii V. A. *Ravnovesnoe termodinamicheskoe modelirovanie dissipativnykh makroskopicheskikh system*. ISEM SO RAN, 2007.
24. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiia i teplovye seti*. Izdatelstvo MEI, 1999.
25. Vagin N. I., Samoplias T. V. *Sistemy ventilyatsii zhilykh pomeshcheniy mnogokvartirnykh domov*. Sankt-Peterburg, 2004.
26. Lobatovkina E. G., Serov A. D. *Metodyka rascheta teplotekhnicheskyykh y enerheticheskyykh parametrov zdaniya y zapolneniye formy enerheticheskogo pasporta*, MHSU, 2015.
27. Matrosov Yu. A., Farenjuk H. H. "Novye gosudarstvennyye normy Ukrainy «Teplovaya yzolyatsyya zdaniy»", *Zhylyshchnoe stroytelstvo*, no. 11, 2007.
28. *Teplova isoliatsiia budivel*. DBN V.2.6-31:2016, Ukrarhbudinform, 2016.
29. Zynger N. Y. *Gydravlycheskiye y teplovye rezhimy teplofykatsyonnykh system*. Energoatom, 1986.
30. Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, Brian Vad Mathiesen. "4-th Generation District Heating (4GDH) Integrating Smart Thermal grids into Future sustainable energy systems." *Energy*, no. 68, 2014.
31. D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Ostergaard, B. Möller, S. Nielsen, H. Lund, ... D. Trier. *Heat Roadmap Europe: second pre-study for the EU27*, 2013.
32. Puzakov V. S. "Teplosnabzheniye po-evropeysky." *Novosti teplosnabzheniya*, no. 8(96), 2008
33. Bejan A. *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, 1996.
34. Redko I., Redko A., Priymak A., Lantsberg N. "Parametry teplovoi seti pri ponizennom temperaturnom drafike." *Ventilyatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 24, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2018, pp. 42-51.

УДК 697.34

## Оптимізація параметрів теплової мережі при зниженому температурному графіку

І. О. Редько<sup>1</sup>, А. О. Редько<sup>2</sup>, О. В. Приймак<sup>3</sup>, О. Ф. Редько<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net), ORCID:0000-0002-9863-4487

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, [andrey.ua-mail@ukr.net](mailto:andrey.ua-mail@ukr.net)  
ORCID: 0000-0003-2331-7273

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, [02opriymak@gmail.com](mailto:02opriymak@gmail.com)

<sup>4</sup>д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, [redko.af@gmail.com](mailto:redko.af@gmail.com),  
ORCID: 0000-0001-8226-7961

*Анотація. Економічні та екологічні проблеми України призводять до зниження температури води в системах теплопостачання. Підвищення вартості палива зробило недоцільним температурний графік 95/70 °С. Для переходу на знижений температурний графік є першу чергу необхідно забезпечити автоматизацію регулювання індивідуальних теплових пунктів. Лише після цього можливе застосування знижених температурних графіків. Це підтверджується успішним досвідом країн, де широко використовується центральне теплопостачання: Данія, Німеччина, Фінляндія, Швеція, Голландія та ін. Модернізація систем теплопостачання України повинна йти шляхом переходу на незалежні системи опалення з якісно-кількісним регулюванням, після чого температурний графік може бути знижений до доцільних значень. Проведено чисельне дослідження оптимальної температури і витрати води в тепловій мережі залежності від конструктивних і режимних параметрів. Також використовувалися результати натурних досліджень опалювальної характеристики житлових будинків і адміністративних будівель, теплопостачання яких здійснюється від двох великих джерел м. Харкова. Чисельно визначено виробництво ентропії в системі теплопостачання залежно від конструктивних і режимних параметрів. У результаті обчислювального експерименту при використанні виробництва ентропії як критерія оптимізації визначено й обґрунтовано параметри зниженого температурного графіка системи теплопостачання для умов м. Харкова.*

*Ключові слова: тепла мережа, знижений температурний графік, чисельне дослідження, оптимізація.*

UDC 697.34

## Optimization of the Parameters of the Heat Network Under a Reduced Temperature Schedule

I. Redko<sup>1</sup>, A. Redko<sup>2</sup>, A. Priymak<sup>3</sup>, A. Redko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkov, Ukraine, [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net)

<sup>2</sup>ScD, professor, Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, [andrey.ua-mail@ukr.net](mailto:andrey.ua-mail@ukr.net),  
ORCID: 0000-0003-2331-7273

<sup>3</sup>Sc.D, professor, Kiev National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [02opriymak@gmail.com](mailto:02opriymak@gmail.com)

<sup>4</sup>ScD, professor, Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, [redko.af@gmail.com](mailto:redko.af@gmail.com),  
ORCID: 0000-0001-8226-7961

*Abstract. The economic and environmental problems of Ukraine lead to decrease the water temperature in heat supply systems. Increasing the cost of fuel made it inappropriate to schedule temperature 95/70. To switch to a lower temperature schedule, at first it is necessary to ensure the automation of the regulation of individual heat points. Only after that it is possible to use reduced temperature schedules. This is confirmed by the successful experience of countries where central heating is widely used: Denmark, Germany, Finland, Sweden, Holland, etc. Modernization of the heat supply systems of Ukraine should go through transition to independent heating systems with qualitative and quantitative regulation, after which the temperature schedule can be reduced to appropriate values. A numerical study of the optimal temperature and water flow in the heat network depending on the design and operating parameters has been carried out. In addition, the results of field studies of the heating characteristics of residential buildings and administrative buildings, the heat supply of which is carried out from two big sources of Kharkov, were used. The entropy production in the heat supply system is numerically determined depending on the design and operating parameters. As a result of the computational experiment, when using entropy production as an optimization criterion, the parameters of the reduced temperature schedule of the heat supply system for the conditions of Kharkiv were determined and substantiated. The results of the numerical study show that the parameters of the heat network at maximum heat load and outdoor air temperature (-25 °C) are as follows: the temperature of the supply network water is 76.7 °C; heat carrier flow rate is 5.7 kg/s, velocity is 0.73 m/s, specific pressure loss is 85.3 Pa/m, specific consumption of electric power to transport the heat carrier is 0.81 W/m, specific heat loss is 33.8 W/m.*

*Key words: heat system, the lower temperature chart, the numerical study, optimization.*

Надійшла до редакції / Received 14.09.2018.



Наукове видання

# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 27

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.nbuv.gov.ua> національної бібліотеки НАН України ім. В.І. Вернадського та на сайті КНУБА [library.knuba.edu.ua](http://library.knuba.edu.ua) (<http://library.knuba.edu.ua/node/78>).

Підписано до друку 08.09.2018. Формат 60×84 1/8  
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Умов. друк. арк. 6,75. обл. вид. арк. 7,25.  
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](http://www.yuston.com.ua)  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції серія дк № 797 від 09.09.2015 р.



