

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ
ТА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

16–18 ЖОВТНЯ

Випуск 29

Київ 2019

70
років
кафедри
ТГПВ

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 29

Kyiv 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 29

Київ 2019

УДК 697
В29

ISSN 2409-2606

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 29 / відповідальний редактор В. П. Корбут. – Київ: КНУБА, 2019. – 50 с.

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

Редакційна колегія: докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (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, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Михайленко; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, професор Б. Рашуо (Сербія); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); докт. техн. наук, професор М. Улевіч (Польща); доктор інженер, доцент А. Ліс (Польща); доктор інженер, доцент А. Уйма (Польща); докт. техн. наук, професор О. Токмаджян (Вірменія); докт. техн. наук, професор А. Маргарян (Вірменія); докт. техн. наук, доцент В. Токмаджян (Вірменія); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 21 червня 2019 року, протокол № 24.

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>	<i>5</i>
<i>В. Б. Довгалюк, Ю. В. Човнюк, Є. О. Іванов, А. К. Ситницька Можливості застосування фрактальних моделей для ідентифікації мікрокліматичних параметрів музейних приміщень.....</i>	<i>6</i>
<i>В. О. Мілейковський Аналітичний опис розширення напівобмежених струмин різної кривини.....</i>	<i>14</i>
<i>Г. С. Ратушняк, О.Г. Лялюк, Д. А. Шпіта Моделювання надійності технічного стану теплонасосної установки з використанням системи нечітких логічних рівнянь лінгвістичних змінних.....</i>	<i>28</i>
<i>П. Капало, О. Т. Возняк, Ю.С. Юркевич, Х. В. Миронюк Забезпечення повітрообміну приміщення для гімнастики (англійською мовою).....</i>	<i>38</i>
<i>В. Г. Наливайко, В. А. Коновалюк Дослідження ефективності застосування водного розчину реагенту “Лексол” для пилоподавлення.....</i>	<i>43</i>

Спонсор видання – компанія ВЕНТС



CONTENTS

<i>Information for the Authors</i>	5
V. Dovhaliuk, Yu. Chovniuk, E. Ivanov, A. Sytnytska <i>The Possibility of Using a Fractal Model to Identify Climatic Parameters of Museum Premises (in Ukrainian)</i>	6
V. Mileikovskiy <i>Analytical description of the expansion of wall jets of different curvature (in Ukrainian)</i>	14
H. S. Ratushniak, O. G. Lyalyuk, D. A. Shpita <i>Modelling the Reliability of the Technical State of a Thermal Pump Installation Using a System of Fuzzy Logic Equations of Linguistic Variables (in Ukrainian)</i>	28
P. Kapalo, O. T. Vozniak, Yu. S. Yurkevych, Kh. V. Myroniuk <i>Ensuring Room Air Exchange for Exercise (in English)</i>	38
V. Nalyvaiko, V. Konovaliuk <i>Investigation of the Efficiency of the Application of Water Solution of “Lexol” Reagent for Preparation of Pulling (in Ukrainian)</i>	43

До відома авторів

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

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

Збірник отримав ідентифікатор DOI, який присвоюється кожній науковій публікації у ньому. Для цього створено новий сайт Збірника, на якому розміщено останні випуски:

<http://vothp.knuba.edu.ua>

На сайті працює система “Open Journal System”. Найближчим часом планується перенос усіх випусків на нову платформу.

Звертаємо увагу авторів на неухильне дотримання Вимог.

Усі матеріали збірника крім реклами ліцензовані на умовах Ліцензії Creative Commons Зазначення Авторства 4.0 Міжнародна (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Реклама може бути вільно завантажена, відтворена без змін та передана іншим особам разом з матеріалами збірника.

Information for the Authors

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

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

The collection has received the identifier DOI, which is assigned to each scholarly publication in it. To do this, a new site of the Collection has been created, featuring the latest issues:

<http://vothp.knuba.edu.ua>

The site has an Open Journal System. In the near future it is planned to transfer all issues to the new platform.

Authors should strictly observe the Requirements.

All materials published in the Collection, except advertising, are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Advertising can be freely downloaded, reproduced without modification, and transferred to other persons along with the materials of the collection.

УДК 519.21

Можливості застосування фрактальних моделей для ідентифікації мікрокліматичних параметрів музейних приміщень

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², Є. О. Іванов³, А. К. Ситницька⁴

¹к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, uchovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203

³старший викладач Національний авіаційний університет України, м. Київ, Україна

⁴асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, sit_ann@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1074-5762

Анотація. Для ідентифікації кліматичних параметрів музейних приміщень використовуються моделі різного типу залежно від поставлених цілей дослідження. Труднощі у виборі моделі зумовлена складністю поведінки систем формування мікроклімату у різні моменти часу, при зміні інтенсивності процесів тепломасообміну в музейних приміщеннях. На прикладі повітряної каруселі Е. Лоренца показано застосування фрактального моделювання для опису поведінки вказаних вище систем як чисельно незвідних систем. Наведено алгоритм визначення області самоподібності для досліджуваного об'єкта, що, на думку авторів, дозволяє знизити ймовірність порушення штатного режиму його роботи. Розглянуті можливості застосування фрактальних моделей для ідентифікації параметрів систем забезпечення мікроклімату музейних приміщень. Запропоновані шляхи ідентифікації складних систем із застосування фрактального формалізму, котрі можуть бути в подальшому використані для вдосконалення існуючих систем створення штучного мікроклімату в музейних приміщеннях на основі функціонування мікроконтролерів з нечіткою логікою.

Ключові слова: фрактал; ідентифікація; мікроклімат; музейне приміщення; карусель Лоренца; область самоподібності.

Постановка проблеми. Сьогодні доволі складно уявити ідентифікацію параметрів систем забезпечення мікроклімату музейних приміщень, як складних систем, без застосування методів математичного моделювання. Тут у подальшому складною системою будемо називати систему з відносно великим числом змінних, частина з котрих змінюється непередбачуваним чином. Серед усіх видів математичних моделей складних систем особливе місце займає модель, при застосуванні якої необхідно здійснювати обґрунтування її належності до фрактального типу. При цьому слід звернути особливу увагу на те, що в окремих об'єктів ідентифікації в деякі моменти часу спостерігаються ситуації, при яких окремі складові системи (або окремі її параметри) змінюються миттєво і несподівано.

Останні дослідження та публікації. Математичні моделі складних систем, котрі належать до фрактального типу, розглянуті в [1-5]. Глобальна нестійкість об'єкту ідентифікації досліджена в [6]. Слід зазначити, що про глобальну нестійкість, котра призводить до обчислюваних незвідних задач ідентифікації нібито детермінованих об'єктів [7], стали говорити саме після відкриття Е. Лоренцем так званої «атмосферної каруселі», котра, наприклад, призводить до не прогнозованості погоди [6].

Е. Лоренц математично описав зміну атмосфери, на котру діють два фактори: нагрівання повітря від землі й охолодження його в її верхніх прошарках. У результаті нагрівання повітря розширюється й піднімається вгору з витісненням холодного повітря, котре спускається. Створюється своєрідна «карусель». Після кількох обертів у одному напрямку, у якийсь момент ця карусель починає обертатися в іншому напрямку, потім знову його змінює і т. д.

Зміна напрямку циркуляції пояснюється таким чином. При великих перепадах температури швидкість руху повітряної маси буде достатньо великою, щоб вона не встигла охолдитися у верхніх шарах атмосфери задля початку спуску. Вона почне «спливати», що загальмує обертання цієї «каруселі». У результаті обертання починається в іншому напрямку. Подібне явище виникає через глобальну нестійкість об'єкта ідентифікації.

У зв'язку з наведеним, дослідження каруселі Е. Лоренца як об'єкта ідентифікації наводять задля демонстрації можливості застосування фрактального формалізму ідентифікації об'єктів і систем з частковим індетермінізмом.

З метою часткового усунення неповноти формальної аксіоматики С. Бір рекомендував використати принцип «зовнішнього доповнен-

ня» [8]. Нові обрані рішення проблеми, котрі виражені мовою більш високого рівня, повинні усувати недоліки первісно використаної мови. Для того, щоб вийти за межі первісно обраної мови, але у той же час не відірватися від реальної ситуації, слід прив'язатися до такої властивості системи, котра нерозривно пов'язана з її реальним існуванням [8].

Формулювання цілей статті. Мета даної роботи полягає в застосуванні фрактального формалізму до створення математичної моделі формування мікроклімату музейного приміщення як об'єкта ідентифікації, котра частково ліквідує невизначеність у результаті неповноти формальної аксіоматики [7].

Основна частина. Системи формування мікроклімату з точки зору методів математичного моделювання є складною системою з відносно великим числом змінних, частина яких змінюється непередбачуваним чином. Для ідентифікації параметрів мікроклімату музейних приміщень використовують моделі різного типу залежно від поставлених цілей досліджень. Серед усіх видів математичних моделей складних систем особливе місце займає модель, при застосуванні якої необхідно здійснювати обґрунтування її належності до фрактального типу [1, 2, 3, 4, 5].

Термін «фрактал» уведений Бену Мадельбротом [1, 2] для позначення множини точок в евклідовому просторі, які мають дробову метричну розмірність, або метричну розмірність, відмінну від топологічної.

Звичайна топологічна розмірність d_T , з якою ми у основному звикли мати справу, приписує зліченній множині розмірність нуль, кривим – розмірність $d_T=1$, поверхням – розмірність $d_T=2$ тощо. Однак, існують криві, які важко відрізнити від площини. Простим прикладом може слугувати траєкторія броунівської частинки. Вона має $d_T=1$. Однак чим тривалішим є час спостереження, тим щільніше траєкторія заповнює площину. Відома така властивість траєкторії броунівської частинки: для довільного малого ε , яке характеризує точність визначення положення броунівської частинки на площині, можна вказати такий скінчений час $t(\varepsilon)$ що траєкторія буде нічим не відрізнитися від площини, більш того,

$$t(\varepsilon) \sim 1/\varepsilon^\alpha, \quad (1)$$

де α – число порядку одиниці, залежне від характеру блукання частинки. Можна заповнювати площину траєкторією деяким регулярним

чином, як це має місце при енергодичному русі.

Хаусдорфом була введена розмірність, котра дозволяє розрізняти (до певних меж) ступінь складності й заплутаності траєкторій. Вона вводиться наступним чином. Розглянемо деяку множину, точки котрої занурені в простір деякої розмірності d_T . Будемо покривати цю множину d_T – вимірними кубами з щільним пакуванням їх. Кубів треба взяти стільки, щоб покрити ними всю розглядувану множину. Позначимо сторону куба через r й число кубів, у які попадає хоча б одна точка множини, через $N(r)$. Тоді Хаусдорфова розмірність множини дорівнює:

$$d_H = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\ln \{N(r)\}}{\ln(1/r)} \right]. \quad (2)$$

Легко впевнитись у тому, що, наприклад, для відрізка прямої чи гладкої кривої $d_H = d_T = 1$, а для елемента площини $d_H = d_T = 2$ тощо. Це означає, що у звичних простих випадках Хаусдорфова й топологічна розмірності збігаються. Різницю або суттєві відмінності слід очікувати для незвичних випадків.

Б. Мандельброт [1] запропонував назвати фракталом множину, для якої її Хаусдорфова розмірність суворо більше топологічної розмірності:

$$d_H > d_T. \quad (3)$$

В окремих об'єктах ідентифікації в деякі моменти часу спостерігаються ситуації, при яких окремі складові системи (або окремі її параметри) миттєво й несподівано змінюють знак своєї дії на протилежний. Прикладом є розглянута вище «атмосферна карусель» Лоренца. Якщо фіксувати моменти часу, у які відбувається зміна напрямку обертання цієї «каруселі», будемо мати випадкову послідовність чисел. Із урахуванням непередбачуваності моменту зміни напрямку обертання каруселі Е. Лоренца даний об'єкт ідентифікації є чисельно незвідним [7].

У межах фрактального формалізму з метою формування моделі для ідентифікації параметрів мікроклімату музейних приміщень вважаємо за доцільне встановлювати області самоподібності визначального параметра, а для доведення справедливості твердження «момент зміни напрямку обертання каруселі Е. Лоренца прогнозований» застосувати принцип зовнішнього доповнення С. Біра.

Складовими визначального параметра мо-

жуть бути обрані швидкість повітря v , м/с, температура t , °С, відносна вологість ϕ , %, після чого область самоподібності визначиться як постійність співвідношення цих складових.

Самоподібність області визначального параметра будемо описувати мовою більш високого рівня, ніж мова, яка застосовувалася до цього, – мовою фрактального формалізму. Покажемо, як застосування цієї мови сприяє визначенню моменту зміни напрямку обертання каруселі Е. Лоренца. Для цього приймаємо, що межі обертання системи, як каруселі Е. Лоренца, з припустимою похибкою визначаються постійністю співвідношення:

$$K = \frac{(\phi_1 \cdot T_1) / v_1}{(\phi_2 \cdot T_2) / v_2} \approx \text{const} , \quad (4)$$

де v_1 – швидкість у зоні з мінімальними значеннями (біля поверхні підлоги приміщення), м/с; v_2 – швидкість у зоні обслуговування (максимально допустима за умови збереження експоната) м/с; T_1, T_2 – температура повітря у вказаних областях, К; ϕ_1, ϕ_2 – відносна вологість повітря у вказаних областях.

Відстань між зонами може дорівнювати відстані від підлоги до верхньої частини музейного експонату. Зміни напрямку обертання повітряної маси на зворотній відбувається не миттєво, а протягом певного відрізка часу, при наближенні визначального параметра до однієї з границь області самоподібності, зі змінною обертання повітряних потоків у приміщенні. Час, який необхідний для зміни знаку обертання – час запізнення – може змінюватись у широкому діапазоні – від нуля до нескінченності.

Реальне визначення фрактальної розмірності за допомогою, наприклад, чисельних методів у дійсності ніколи не здійснюється на нескінченній множині, і число точок, які покриваються, обмежене деякою величиною N_0 . Тому для скінченного числа точок завжди існує мінімальна відстань між ними r_{min} . При зменшенні r , коли починає виконуватися нерівність $r_n < r_{min}$, величина $N(r_n)$ припиняє змінюватись і досягає значення N_0 . Тому для визначення d_H згодиться лише деяка прямолінійна ділянка, що лежить між дуже великими й дуже малими значеннями $1/r$, якщо така існує.

Використання фрактальної розмірності (у подальшому позначатимемо $d_H = D$) дає можливість отримати ще одну важливу характеристику складних об'єктів. Широке коло застосувань цього поняття описане у книзі Б. Мандельброта [1]. Незаважко виявити, що формула (2)

встановлює деяке співвідношення подібності (а саме, коефіцієнт самоподібності K) між об'єктами, що буде доведено далі.

З використанням роботи [2], встановлюємо зв'язок D з ренормалізаційною групою. Розглянемо деяку фігуру A_0 та її послідовні перетворення:

$$A_1 = T \cdot A_0, \quad A_n = T \cdot A_{n-1} = \dots = T^n \cdot A_0 . \quad (5)$$

Одночасно з отриманою T , яка полягає, наприклад, у збільшенні деталізації фігури A_i , розглянемо зміну масштабу r на фактор a :

$$S A_i(r) = A_i(r/a) . \quad (6)$$

Будемо тепер цікавитися деякою величиною V , що характеризує об'єм чи поверхню фігури A_i . Розглянемо величину

$$V(S A_{n+1}) = V(S T A_n) . \quad (7)$$

Якщо існує подібність при дії оператора

$$R = S \cdot T , \quad (8)$$

тоді можна записати зв'язок між об'єктами $V(A_n)$ та $V(\hat{R} A_n)$ у вигляді:

$$V(\hat{R} A_n) = a^d \cdot V(A_n) , \quad (9)$$

де d – деяка степінь.

У загальному випадку співвідношення подібності (9) може виконуватися тільки в граничному випадку $n \rightarrow \infty$:

$$d = K = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\ln [V(S A_{n+1}) / V(A_n)]}{\ln a} \right\} . \quad (10)$$

Розглянемо послідовність (5) фігур A_i та припустимо, що вона має нерухому точку A^* . Тоді вираз (10) перетворюється у наступний:

$$d = K = \frac{\ln [V(S A^*) / V(A^*)]}{\ln a} \quad (11)$$

або еквівалентне співвідношення:

$$V(S A^*) = a^d \cdot V(A^*) . \quad (12)$$

Неважко помітити, що визначення (11), для $d = K$, збігається з визначенням $d_n = D$ при $a \rightarrow \infty$. Дійсно, згідно з (6) тільки величина $V(SA^*) = V(A^*(r/a))$ залежить у чисельнику формули (11) від a тому:

$$d = K \xrightarrow{a \rightarrow \infty} \frac{\ln V(SA^*)}{\ln a} = d_n = D. \quad (13)$$

З іншого боку, можна вважати оператор \hat{R} відповідним операторові ренормалізаційної групи, котра за припущенням має нерухому точку A^* . Співвідношення (11) виникло внаслідок існування нерухомої точки. (Зв'язок фрактальної розмірності з наближенням ренормалізаційної групи обговорювався у [3]).

Отже, описані вище міркування дозволяють поглянути на фрактальну розмірність ($d_n = D$) як на розмірність подібності об'єму фігури ($D \equiv K$), що відповідає нерухомій точці (12). Слід зазначити, що ренормалізаційною властивістю можна описати й таку характеристику системи, котра, взагалі кажучи, не пов'язана з розмірністю множини [2].

Для подібних технологій спосіб визначення області самоподібності, наведений вище, може слугувати аналогом індикатора, котрий постійно ресеструє наближення визначального параметра до однієї з границь системи. Це сигналізує ймовірність виникнення позаштатної

ситуації. Під границею системи у даному випадку розуміємо область самоподібності з її межами, що визначаються ключовим (визначальним) параметром цієї системи.

Висновки. При управлінні мікрокліматом музейних приміщень необхідно передбачити систему, яка своєчасно подає сигнал про збільшення ймовірності виникнення позаштатної ситуації (надмірна вологість, підвищена температура в зоні, де знаходяться картини). Для цього необхідно визначити одну з границь області самоподібності параметрів повітряного середовища при вході повітряного потоку в зону обслуговування (зона розміщення експонатів), а другу границю області самоподібності на виході повітряного потоку з зони обслуговування. Якщо, по мірі наближення визначального параметра (D чи K), до однієї з меж області самоподібності буде фіксуватись ймовірність виникнення нештатної ситуації, то, система управління мікрокліматом змінює згідно з алгоритмом продуктивність кондиціонерів, параметри припливного повітря або тип струмин у системі повітророзподілення. Запропоновані в роботі шляхи ідентифікації складних систем із застосуванням фрактального формалізму, котрі базуються на визначенні області самоподібності визначального параметра, можуть бути в подальшому використані для вдосконалення існуючих систем створення штучного мікроклімату у музейних приміщеннях на основі функціонування мікроконтролерів з нечіткою логікою.

Література

1. Mandelbrot B. V. The Fractal Geometry of Nature / B. V. Mandelbrot. – New York, San Francisco: Basic Books, 2004 – 328 p.
2. Bolshakov V. Fractals and properties of materials / V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p.
3. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // Technical Journal. – 2018. – Vol.12. – №.2. – pp. 93-97. DOI: 10.31803/tg-20180302115027
4. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Киев: Академперіодика, 2017. – 170 с.
5. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – вып. 7. – С. 949-957.
6. Журавель І. М. Вибір налаштувань під час обчислення поля фрактальних розмірностей зображення / І. М. Журавель // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук. пр. / Нац. лісотехн. ун-т України. – 2018. – Т. 28. – №2. – С.159-163. DOI: 10.15421/40280230
7. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow / E. N. Lorenz // Journal of the atmospheric Sciences. – 1963. – Vol. 20. – Iss. 20. – pp. 140-148.
8. Дубров Ю. Вычислительно неприводимые системы и пути их идентификации / Ю. Дубров. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 188 с.
9. Бир С. Кибернетика и управление производством / С. Бир. – Москва: Физматгиз, 1963. – 276 с.
10. Godel K. Uber formal unentscheidbare Satze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I / K.

Godel // Monatshefte fur Mathematik und Physik. – 1931. – Vol. 38. – pp. 173-198.

References

1. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. Basic Books, 2004.
2. Bolshakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Lambert Academic Publishing, 2016.
3. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. “Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism.” *Technical Journal*. 2018. Vol.12. №2. P. 93-97. DOI: 10.31803/tg-20180302115027
4. Bolshakov V. I., Volchuk V. N., Dubrov Yu. I. *Osnovy orhanyzatsyy fraktalnoho modelyrovanyia*. Akadempriodika, 2017.
5. Volchuk V. N. “K primeneniiu fraktalnogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologii.” *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2017. – Vol. 39. Iss. 7. P. 949-957.
6. Zhuravel I. M. “Vybir nalashtuvan pid chas obchyslennia polia fraktalnykh rozmirnostei zobrazhennia.” *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy: zb. nauk. pr. Nats. lisotekhn. un-t Ukrainy*. 2018. Vol. 28. №2. P. 159-163. DOI: 10.15421/40280230
7. Lorenz E. N. “Deterministic nonperiodic flow.” *Journal of the atmospheric Sciences*. 1963. Vol. 20. Iss. 20. P. 140-148.
8. Dubrov Yu. *Vychislitelno neprivodimye sistemy i puti ikh identifikatsii*. Palmarium Academic Publishing, 2016.
9. Bir S. *Kibernetika i upravlenie proizvodstvom*. Fizmatgiz, 1963.
10. Godel K. “Uber formal unentscheidbare Satze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I.” *Monatshefte fur Mathematik und Physik*. 1931. Vol. 38. P. 173-198.

УДК 519.21

Возможности применения фрактальной модели для идентификации климатических параметров музейных помещений

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², Е. А. Иванов³, А. К. Ситницкая⁴

¹к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., проф. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, ychovnyuk@ukr.net

³старший преподаватель. Национальный авиационный университет Украины, г. Киев, Украина

⁴асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, sit_ann@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1074-5762

Аннотация. Для идентификации климатических параметров музейных помещений используются модели различного типа в зависимости от поставленных целей исследования. Трудности в выборе модели обусловлена сложностью поведения систем формирования микроклимата в разные моменты времени, при изменении интенсивности процессов теплообмена в музейных помещениях. На примере воздушной карусели Е. Лоренца показано применение фрактального моделирования для описания поведения указанных выше систем как численно несводимых систем. Приведён алгоритм определения области самоподобия для исследуемого объекта, что, по мнению авторов, позволяет снизить вероятность нарушения штатного режима его работы. Рассмотрены возможности применения фрактальных моделей для идентификации параметров систем обеспечения микроклимата музейных помещений. Предложены пути идентификации сложных систем по применению фрактального формализма, которые могут быть в дальнейшем использованы для совершенствования существующих систем создания искусственного микроклимата в музейных помещениях на основе функционирования микроконтроллеров с нечёткой логикой.

Ключевые слова: фрактал; идентификация; микроклимат; музейное помещение; карусель Лоренца; область самоподобия.

UDC 519.21

The Possibility of Using a Fractal Model to Identify Climatic Parameters of Museum Premises

V. Dovhaliuk¹, Y. Chovniuk², M. Shyshyna³

¹PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²PhD, professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ychovnyuk@ukr.net

³ senior teacher. National Aviation University of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁴Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, sit_ann@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1074-5762

Abstract. To identify climatic parameters of museum premises there are models of different types depending on the goals of the research: modification of the algorithm of the microclimate control, the performance of air conditioners, the parameters of the inflow air or selection of air distribution system. The difficulty in choosing a model is due to the complexity of the behaviour of microclimate formation systems at different moments of time, with the change in the intensity of heat-mass transfer processes in museum premises. Using the example of the air merry-go-round of E. Lorenz, the use of fractal modelling is shown to describe the behaviour of the above systems as numerically invariant systems. Here is given an algorithm for determination of the region of self-similarity for the investigated object, which, according to the authors, may reduce the probability of a violation of the regular conditions of its operation. In the article there are possibilities of using fractal models for identifying the parameters of the systems of providing the microclimate in museum premises. The ways of identifying complex systems using fractal formalism are suggested, which can be further used to improve the existing systems of formation the artificial microclimate in museum premises on the basis of the operation of microcontrollers with fuzzy logic. It is established that there is a need to provide a system that promptly sends a signal about an increase in the probability of an unusual situation (excessive humidity, high temperature in the area where the paintings are located). To do this, it is necessary to determine one of the boundaries of the region of self-similarity of the air parameters when entering the air flow into the service area (the location of the exhibit), and the second boundary of the region of self-similarity at the outflow of air flow from the service area.

Keywords: fractal; identification; microclimate; museum room; Lorenz Merry-Go-Round; area of self-similarity.

Надійшла до редакції / Received 11.03.2019



ТВІНФРЕШ

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ ПРОВІТРЮВАЧІ З РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ЕНЕРГІЇ



Забезпечують
приміщення чистим
повітрям



Працюють
із мінімальним
енергоспоживанням

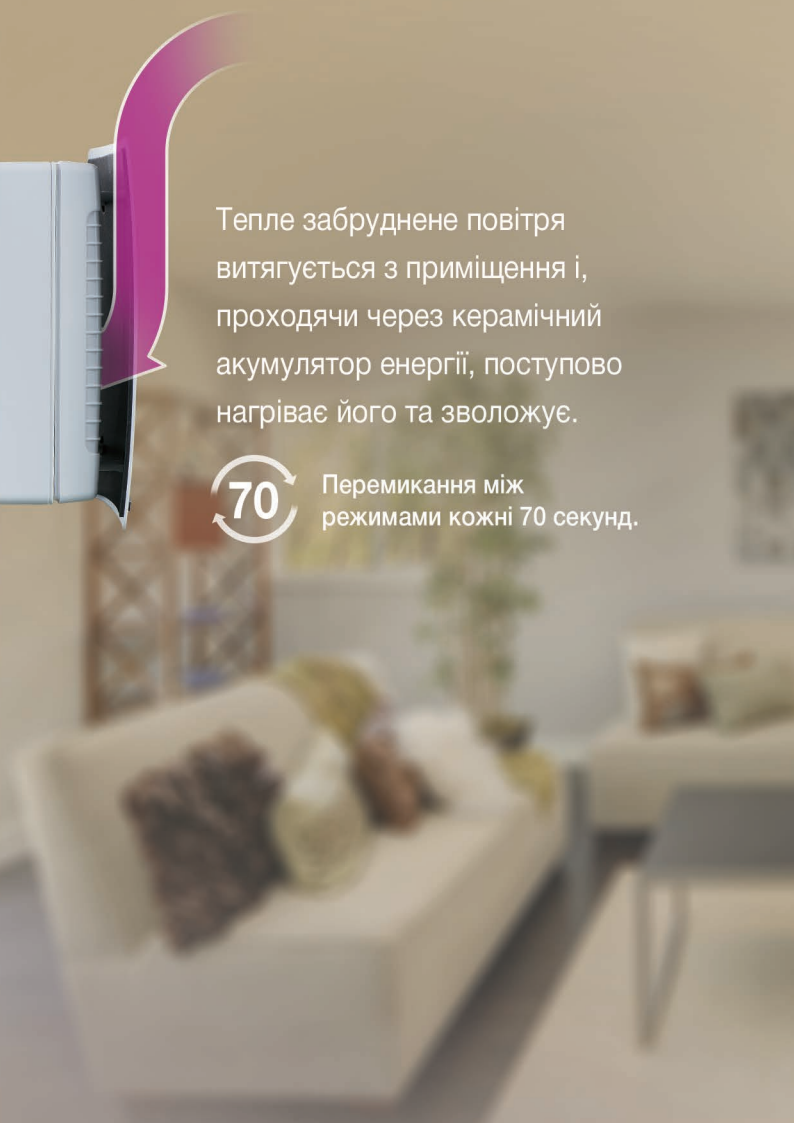


Повертають тепло
та забезпечують баланс
вологості у приміщенні



I ЦИКЛ


Витягання
повітря



Тепле забруднене повітря
витагується з приміщення і,
проходячи через керамічний
акумулятор енергії, поступово
нагріває його та зволожує.



Перемикання між
режимами кожні 70 секунд.



Свіже, але холодне повітря з вулиці, проходячи через керамічний акумулятор енергії, зволожується та підігрівається до кімнатної температури за рахунок накопиченого в акумуляторі тепла.

II ЦИКЛ

Приплив
повітря



УДК 697.92

Аналітичний опис розширення напівобмежених струмин різної кривини

В. О. Мілейковський¹¹к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, v_mil@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8543-1800

Анотація. Робота присвячена аналітичному дослідженню розширення струмин, що настилаються на опуклу та гнуту поверхні (криволінійних напівобмежених струмин). Такі струмини мають різні характеристики залежно від кривини поверхні – від далекобійних до таких, що швидко затухають. Це робить їх одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності організації повітрообміну в приміщеннях різного призначення. Однак, на сьогодні вони не набули широкого впровадження, що пов'язано з нестабільністю розвитку струмини. Проблема усувається використанням правильної форми каналу для випуску повітря. Для визначення розширення струмини розроблено підхід до аналітичного опису криволінійних напівобмежених струмин шляхом геометричного аналізу їхньої турбулентної макроструктури. Ця структура подається у вигляді пелени дотичних великомасштабних вихорів (клубів). Для ефективного розв'язання отриманих рівнянь було скореговано метод Андерсона-Бйорка. Отримані результати показують слабке розширення гнутих струмин і значно швидше – для опуклих. Розрахунки показали наявність кризового перерізу зі швидким розширенням опуклої струмини і подальшим підвищенням темпом її розширення. Також отримано переріз відриву струмини. Якщо ширина щілини менша за $0,15...0,2$ радіуса поверхні настилення, то кут проходження струмини значно зменшується, що зменшує розширення струмини і ускладнює конструкцію розроблених на кафедрі теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури багатоцилінричних повітророзподільників.

Ключові слова: напівобмежена струмина, турбулентна струмина, теорія струмин, організація повітрообміну, турбулентна макроструктура.

Вступ. Енергоспоживання систем забезпечення мікроклімату залежить від ефективності організації повітрообміну. На кафедрі теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури розробляються повітророзподільники, що формують струмини, які настилаються на опуклі поверхні (опуклі напівобмежені струмини) та на гнуті поверхні (гнуті напівобмежені струмини). Параметри струмин змінюються в широких межах при зміні кривини поверхні настилення. Наприклад, опуклі струмини активно підсмоктують навколишнє повітря і швидко затухають, у той час як плоскі та гнуті напівобмежені струмини мають значно більшу далекобійність. Це відкриває широкі перспективи використання криволінійних напівобмежених струмин у приміщеннях різного призначення. Розширення таких струмин є визначальним фактором роботи зазначених повітророзподільних пристроїв. На сьогодні теорія подібних течій не достатньо розвинута, що призводить до потреби тривалих і ресурсомістких експериментальних досліджень при розробці подібних повітророзподільників.

Актуальність дослідження. Вирішення проблеми наукового обґрунтування й розроблення теоретичних методів розрахунку розширення криволінійних напівобмежених струмин є надзвичайно актуальним, оскільки дозволяє з мінімальними витратами часу й ресурсів роз-

робляти повітророзподільні пристрої з різними характеристиками.

Останні дослідження та публікації. Історія розробки повітророзподільників, що працюють на цьому принципі (рис.1 а,б) починається з патенту Франції №724.614 1932 року [1].

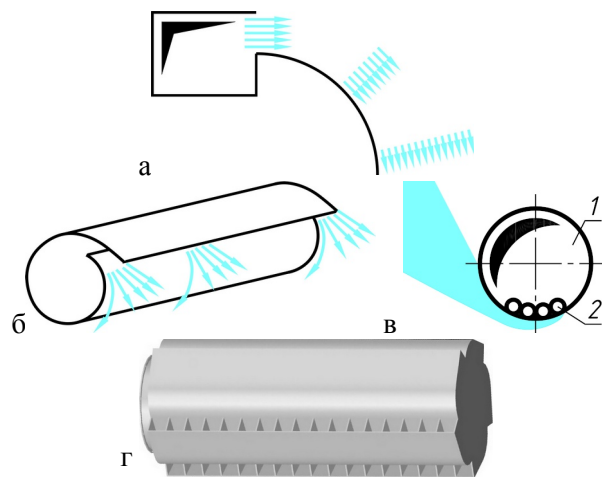


Рис. 1. Варіанти повітророзподільника: а – прямокутний за патентом [1], б – круглий за патентом [1]; в – трубний [2], г – повітророзподільник ПЕТ [3, 4, 5]: 1 – повітровід; 2 – випуски з напрямними

Однак, за цей час не було створено повітророзподільників широкого призначення. Серійно виробляються повітророзподільники

(рис.1 в) для трубних вентиляційних систем [2], що частково реалізують даний принцип.

Результати авторських досліджень [6] показали, що для стабільного настилення довжина плоского або конфузорного вихідного каналу не повинна бути меншою за дві ширини щілини. Кривий, дифузорний або короткий канал призводить до порушення настилення. Найменші деформації повітророзподільника призводять до суттєвої зміни параметрів струмини.

Нестабільність роботи повітророзподільників і є причиною малого їхнього розповсюдження. Якщо виконати вихідний канал за наведеними рекомендаціями, отримана струмина буде стабільною, швидко затухатиме зі зниженням інтенсивності турбулентності і без створення додаткового аеродинамічного опору, тобто витрат енергії на вентиляторі. Це відповідає ДБН В.2.5-67:2013 [7], за яким зниження інтенсивності турбулентності допускає збільшення швидкості повітря в робочій зоні, м/с.

Проф. А. Я Ткачук, В. Б. Довгалюк та автор розробили повітророзподільники [3, 4, 5] ежекційні тангенціальні (ПЕТ) для вентиляції теплонапружених приміщень у стиснутих умовах рис. 1 г. Вони передбачають взаємодію опуклих напівобмежених струмин. Емпірично встановлено необхідність п'яти щілин. Обмеження ширини щілин не були виявлені. Основним гальмом розвитку цього напрямку є проблеми моделювання цих струмин на поширеному програмному забезпеченні [8] обчислювальної гідромеханіки, яке може давати [9] результати, що суперечать дослідним. Для подальшого розвитку цього напрямку досліджень необхідний відповідний метод розрахунку струмин.

На відміну від таких підходів професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури А.Я. Ткачук на базі методу особливостей створив метод розв'язання турбулентних примежових шарів [10]. Розриви тангенціальної складової швидкості замінюються вихровою пеленою. Продовженням цього напрямку досліджень є аналітичний опис струмин та інших течій з турбулентною макроструктурою. Напівобмежені струмини, що настиляються на плоскі або криволінійні поверхні, мають пристінний та струминний примежові шари. Останній [11] моделюється пеленою дотичних клубів – великомасштабних вихорів – які котяться вільною межею. Для пристінного шару доцільно використати гіпоте-

зу І. А. Шепелева [12], що дозволяє вилучити його з розгляду шляхом розтягнення клубів до поверхні настилення без зміни ширини струмини. Саме цей підхід доцільно вжити для визначення розширення напівобмежених струмин різної кривини.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є аналітичний опис профілю швидкості та інтенсивності турбулентності напівобмежених струмин різної кривини в супутньому або зустрічному потоку.

Принципи аналітичного опису криволінійних напівобмежених струмин. Розглянемо [11, 12, 13] джерело Толміна (рис. 2), потік від якого витікає з нескінченно тонкої щілини O тангенціально до циліндричної стінки радіусом R , м, з центром (проекція осі) A . Струминний примежовий шар подається як пелена клубів $\dots 1, 2, \dots, i, \dots$ радіусом R_i , м, що котяться вільною межею b . Використовуємо уточнену гіпотезу І. А. Шепелева шляхом умовного розтягнення клубів до поверхні настилення. Уводимо видозмінену систему полярних координат (φ, r) з центром A . Радіус-вектор r , м, відраховуватимемо від поверхні настилення вглиб струмини.

Для опуклих струмин вісь u спрямована від центру A . Для гнутих струмин вона спрямована до центру A , причому $r \leq R$, м. Виберемо клуб 1 , що торкається осі x . Проводимо відрізок F_1G_1 радіуса поверхні настилення крізь точку торкання клубів T_{1z} . Характерні радіус-вектори, м, у розрахунковому перерізі: u_0 – центра O_1 клубу 1 ; u_b – точки B_1 – вільної межі струмини b , а u_m – точки лінії максимальної швидкості m . Позначимо кут O_1AO_1 між клубами i та j $\Delta\varphi_{ij}$.

Особливістю гнutoї струмини є взаємодія її з супутнім потоком, що підтікає до наступних перерізів зі швидкістю v , м/с (рис. 2 б). Проекція цієї швидкості на вісь x біля межі струмини становить u_b , м/с. Тому ці струмини за нерухомого навколишнього середовища розвиваються в супутньому потоку.

Для отримання спільних формул для опуклих, плоских і гнутих струмин розглянемо їх у супутньому або зустрічному потоку зі швидкістю u_b , м/с, на межі струмини в напрямку розвитку струмини. Цей потік є циркуляційною течією навколо поверхні настилення. Швидкість u_b , м/с, не дорівнює швидкості на нескінченній відстані u_∞ , м/с. Уводимо надлишкові швидкості в потоку $\Delta u = u - u_b$, м/с, та поступального руху клубу $\Delta w = w - u_0$, м/с. Розширення криволінійних струмин є одним з найбільш важливих їхніх параметрів.

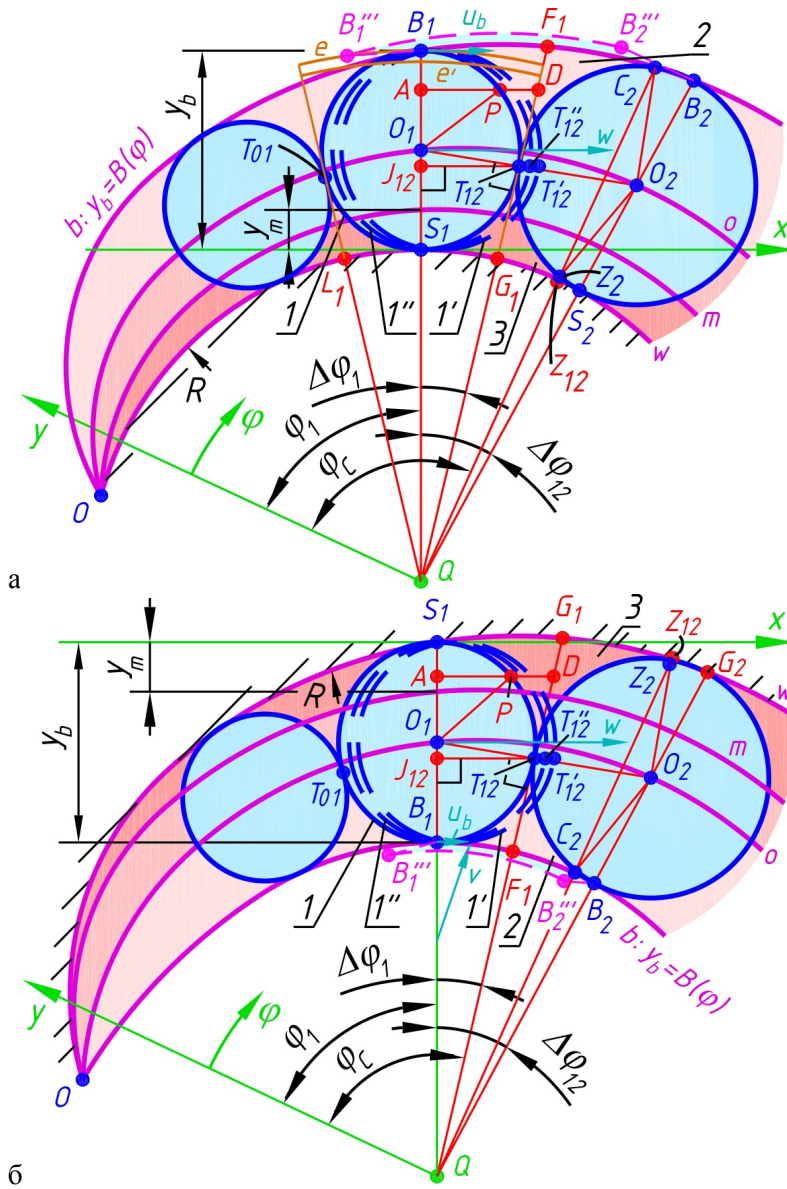


Рис. 2. Схема напівобмеженої струмини:
а – гнутаї; б – опуклої:

1 – клуб; 2 – зовнішня частина міжклубного шару; 3 – внутрішня частина міжклубного шару

Вільна межа струмини b нелінійна і на основній ділянці описується заздалегідь невідомою неперервною гладкою функцією:

$$y_b = RB(\varphi), \text{ м.} \quad (1)$$

Оскільки ця функція невідома, то неможливо довести чи спростувати геометричну прогресію розмірів клубів. Кут $\Delta\varphi_{12}$ між лініями QO_1 і QO_2 визначається з трикутника ΔQO_1O_2 , де $|QO_1| = R \pm RB(\varphi_1)$, $|QO_2| = R \pm RB(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})$, $|O_1O_2| = B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})$:

$$EQ_{\Delta\varphi_{12}}(\varphi_1, \Delta\varphi_{12}) = (2 \pm B(\varphi_1)) \times$$

$$\begin{aligned} & \times (2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})) \cos(\Delta\varphi_{12}) + \\ & + B(\varphi_1) B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) - \\ & - 2 \left(2 \pm (B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})) \right) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

З цього ж трикутника за теоремою Стюарта визначається довжина, m , відрізка QT_{12} :

$$\begin{aligned} \frac{|QT_{12}|}{R} &= \sqrt{1 \pm \frac{4}{R} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \\ &= \sqrt{1 \pm \frac{2 B(\varphi_1) B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}}. \end{aligned} \quad (3)$$

За формулою (3) визначається відносна ордината точки T_{12}

$$\begin{aligned} \frac{y_{T_{12}}}{R} &= \frac{|G_1 T_{12}|}{R} = \frac{|Q T_{12}| - |Q G_1|}{R} = \\ &= \pm \left(\sqrt{1 \pm \frac{2B(\varphi_1)B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (4)$$

З трикутника ΔQO_1T_{12} за теоремою косинусів:

$$\begin{aligned} \cos(\angle QO_1T_{12}) &= \\ &= \frac{R_1 \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_1}{R} \right) \mp \left(\frac{R_2}{R} - \frac{R_1}{R} \right)}{\left(1 \pm \frac{R_1}{R} \right) \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_1}{R} \right)} = \\ &= \frac{1}{\left(2 \pm B(\varphi_1) \right) \left(B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + B(\varphi_1) \right)} \times \\ &\times B(\varphi_1) \left(B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + B(\varphi_1) \right) \mp \\ &\mp 2 \left(B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) - B(\varphi_1) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \cos(\Delta\varphi_1) &= \cos(\angle O_1QT_{12}) = \\ &= \left(1 \pm \frac{2 \frac{R_1}{R} \frac{R_2}{R}}{\left(1 \pm \frac{R_1}{R} \right) \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_1}{R} \right)} \right) \times \\ &\times \sqrt{\frac{\frac{R_2}{R} + \frac{R_1}{R}}{\left(1 \pm 4 \frac{R_1}{R} \right) \frac{R_2}{R} + \frac{R_1}{R}}} = \\ &= \left(1 \pm \frac{2B(\varphi_1)B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{\left(2 \pm B(\varphi_1) \right) \left(B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + B(\varphi_1) \right)} \right) \times \\ &\times \sqrt{\frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + B(\varphi_1)}{\left(1 \pm 2B(\varphi_1) \right) B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + B(\varphi_1)}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Формули (4), (5) і (6) дозволяють визначити координати точки T_{12} , якщо відомий кут φ_1 .

Опустимо перпендикуляр з точки T_{12} на лінію QB_1 . Основа цього перпендикуляра – точка J_{12} . З прямокутного трикутника $\Delta O_1J_{12}T_{12}$:

$$\begin{aligned} \frac{|O_1J_{12}|}{R} &= \pm \frac{R_1}{R} \left(1 - \frac{2 \frac{R_2}{R}}{\left(1 \pm \frac{R_1}{R} \right) \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_1}{R} \right)} \right) = \\ &= \pm \frac{1}{2} B(\varphi_1) \times \\ &\times \left(1 - \frac{4B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{\left(2 \pm B(\varphi_1) \right) \left(B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + B(\varphi_1) \right)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Тоді відносна довжина відрізка B_1J_{12} становитиме:

$$\begin{aligned} \frac{|B_1J_{12}|}{R} &= \frac{|B_1O_1|}{R} \pm \frac{|O_1J_{12}|}{R} = \\ &= 2 \frac{\left(\frac{R_1}{R} \right)^2}{\frac{R_1}{R} + \frac{R_2}{R}} \left(1 \pm \frac{\frac{R_2}{R}}{1 \pm \frac{R_1}{R}} \right) = \\ &= \frac{B^2(\varphi_1)}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \left(1 \pm \frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2 \pm B(\varphi_1)} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

За нескінченно малий час $d\tau$, с, клуб 1 займе положення 1'. Зсув клубу визначатиметься рівнянням

$$\begin{aligned} \Delta T_p &= \overline{\Delta T}_p \frac{|AP|}{|AD|} = \Delta T_m \frac{\sqrt{(y_b - y_o)^2 - (|y| - y_o)^2}}{y_b - y_o} \times \\ &\times \begin{cases} 1 & \text{при } y \leq y_s \\ 1 - \frac{y - y_s}{y_b - y_s} \left(1 - \frac{\Delta T_b}{\Delta T_m} \right) & \text{при } y > y_s \end{cases} = \\ &= \Delta T_m \frac{\sqrt{(y_b - y_o)^2 - (|y| - y_o)^2}}{y_b - y_o} \times \\ &\times \begin{cases} 1 & \text{при } y \leq y_s \\ 1 - \left(1 - \frac{y_b - y}{2y_o} \right) \left(1 - \frac{\Delta T_b}{\Delta T_m} \right) & \text{при } y > y_s \end{cases}. \end{aligned} \quad (9)$$

Надамо межі клубу 1 руху зі швидкістю навколишнього потоку u_b , м/с. За цей же час, с, клуб займе положення 1'' зі зсувом

$$dx_0 = u_b dt. \quad (10)$$

Відстань між колами 1' та 1'', м:

$$dx_{\Delta} = (w - u_b) dt = \Delta w dt, \text{ м.} \quad (11)$$

Для визначення площі, м², фігур на рис. 2 з урахуванням рівнобедреності $\Delta Z_2 O_2 C_2$ визначаємо кути $\angle O_2 Z_2 C_2 = \angle O_2 C_2 Z_2$. Для опуклої поверхні настилення ці кути дорівнюють $\pi - \angle O_2 Z_2 Q$, а для гнutoї струмини – $\angle Q Z_2 O_2$. Обидва випадки з $\Delta Q Z_2 O_2$ описуються однією залежністю:

$$\begin{aligned} & \angle O_2 Z_2 C_2 = \angle O_2 C_2 Z_2 = \\ & = \arcsin \left(\frac{|Q O_2|}{|Z_2 O_2|} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{C_2}) \right) = \\ & = \arcsin \left(\frac{R + R \frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2}}{R \frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2}} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{C_2}) \right) = \\ & = \arcsin \left(\frac{2 + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{C_2}) \right) \quad (12) \end{aligned}$$

З $\Delta Z_2 O_2 C_2$ визначаємо з урахуванням формули (12) кут

$$\begin{aligned} & \angle Z_2 O_2 C_2 = \pi - 2 \angle O_2 Z_2 C_2 = \\ & = 2 \arccos \left(\frac{2 + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \right. \\ & \quad \left. + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{C_2}) \right), \quad (13) \end{aligned}$$

де φ_{C_2} – кут точки C_2 перетину меж клуба 1 з лінією w : ця точка відмінна від B_2 (окрім частинного випадку дотичності межі струмини) і приймається як відмінний від $\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}$ корінь рівняння

$$EQ_{C_2}(\varphi_1, \varphi_{C_2}) = Y^{\pm}(\varphi_{C_2}, \varphi_1) - B(\varphi_{C_2}) = 0, \quad (14)$$

$Y^{\pm}(\varphi, \varphi_1)$ – більше (індекс “плюс”) або менше (індекс “мінус”) значення координати y , м, межі клуба 2, віднесене до радіуса, м, поверхні настилення (оскільки при заданому вигляді функції B кут $\Delta\varphi_{12}$ залежить лише від кута φ_1 за рівнянням (2), то кут $\Delta\varphi_{12}$ не виноситься як окремий аргумент):

$$\begin{aligned} Y^{\pm}(\varphi, \varphi_1) &= \left(\frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2} \pm 1 \right) \times \\ & \quad \times \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi) \mp 1 \pm \\ & \quad \pm \left(\frac{B^2(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{4} - \left(\frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2} \pm 1 \right)^2 \right) \times \\ & \quad \times \sin^2(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi). \quad (15) \end{aligned}$$

Найбільш імовірним є отримання потрібно-го кореня рівняння (14) при вживанні функції (15) зі знаком “+”, що відповідає більшому віддаленню точки C_2 від поверхні настилення w . Однак, при швидкому розширенні біля відриву можливий і знак “-”, що відповідає меншому віддаленню точки C_2 від поверхні настилення w .

Для відокремлення кореню визначається мінімальне значення кута φ , за якого рівняння (14) має сенс, за ненегативним підкореневим виразом функцій (15). Максимальне значення відповідає куту центра клуба 2. Тоді інтервал пошуку кореню

$$\varphi \in \left[\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \arcsin \left(\frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2 + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \right), \varphi_1 + \Delta\varphi_{12} \right) \quad (16)$$

У верхній (відкритій) межі інтервалу (16) завжди існує корінь рівняння (14) з уживанням функції (15) зі знаком “+”, що слід враховувати при чисельному розв’язанні. При вживанні знаку “-” інтервал (16) повинен бути інтервалом ізоляції кореню. Якщо не існує кореню рівняння (14) в інтервалі (16), то $C_2 \equiv B_2$, що також відповідає більшому віддаленню точки C_2 від поверхні настилення w .

Площа A_{Σ} , м², складається з площ, м², які визначені з урахуванням рівнянь (8) і (13):

- криволінійного чотирикутника $S_1 B_1 C_2 Z_{12}$: (C_2 – точка перетину лінії b та межі клуба 2; Z_{12} – точка перетину лінії QC_2 з поверхнею настилення w)

$$\begin{aligned} A_{S_1 B_1 C_2 Z_{12}} &= \\ & = \pm \frac{1}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_{C_2}} (RB(\varphi) \pm R)^2 d\varphi \mp \frac{1}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_{C_2}} R^2 d\varphi = \end{aligned}$$

$$= \frac{R^2}{2} \left(\mp \varphi_{c_2} \pm \varphi_1 \pm \int_{\varphi_1}^{\varphi_{c_2}} (B(\varphi) \pm 1)^2 d\varphi \right), \text{ м}^2; \quad (17)$$

- половини клуба 1 $B_1 T_{01} S_1$:

$$A_{B_1 T_{01} S_1} = \frac{1}{2} \frac{\pi (RB(\varphi_1)^2)}{4} = \frac{\pi R^2}{8} B^2(\varphi_1), \text{ м}^2; \quad (18)$$

- криволінійного трикутника $Z_2 Z_2 S_2$ (Z_2 – точка перетину лінії QC_2 з межею клуба 2, відмінна від C_2), яка визначається за площею, м^2 , трикутника $QZ_2 O_2$ та секторів $O_2 Z_2 S_2$ й $QZ_2 S_2$, а після перетворень становить

$$\begin{aligned} A_{Z_2 Z_2 S_2} &= \pm A_{QZ_2 O_2} - A_{O_2 Z_2 S_2} \mp A_{QZ_2 S_2} = \\ &= \frac{R^2}{8} \left(\pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) (2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})) \times \right. \\ &\times \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \mp \right. \\ &\mp \left. \sqrt{1 - \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right)^2} \right) \times \\ &\times \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) - B^2(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) \times \\ &\times \left(\arcsin \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right) \mp \right. \\ &\left. \mp (\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \mp 4(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right), \text{ м}^2; \quad (19) \end{aligned}$$

- якщо точка C_2 знаходиться далі від поверхні настилання ніж точка торкання дотичної з центра Q до межі клуба 2, то від цих складових слід відняти площу, м^2 , сегмента $C_2 T_{12} Z_2$ (в інших випадках цей сегмент знаходиться поза межами загальної площі A_Σ , м^2), для якого після перетворень маємо

$$\begin{aligned} A_{Z_2 T_{12} C_2} &= A_{O_2 Z_2 T_{12} C_2} - A_{\Delta O_2 Z_2 C_2} = \frac{R^2}{4} B^2(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) \times \\ &\times \left(\arccos \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right) - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- \frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \times \\ &\times \sqrt{1 - \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right)^2} \quad (20) \end{aligned}$$

За формулами (17), (18), (19) та (20)

$$\begin{aligned} A_\Sigma &= A_{S_1 B_1 C_2 Z_2} + A_{B_1 T_{01} S_1} + A_{Z_2 Z_2 S_2} - [A_{Z_2 T_{12} C_2}] = \\ &= \frac{R^2}{8} \left(\pm 4 \int_{\varphi_1}^{\varphi_{c_2}} (B(\varphi) \pm 1)^2 d\varphi + \pi B^2(\varphi_1) \pm \right. \\ &\pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) (2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})) \times \\ &\times \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \mp \right. \\ &\mp \left. \sqrt{1 - \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right)^2} \right) \times \\ &\times \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) - B^2(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) \times \\ &\times \left(\arcsin \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right) \mp \right. \\ &\mp (\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \mp 4\Delta\varphi_{12} - \left. \left[2 B^2(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) \times \right. \right. \\ &\times \left(\arccos \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right) - \right. \\ &- \left. \frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \times \right. \\ &\left. \left. \times \sqrt{1 - \left(\frac{2 \pm B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12} - \varphi_{c_2}) \right)^2} \right] \right] \quad (21) \end{aligned}$$

У рівнянні (21) член у квадратних дужках враховується лише якщо лінія b перетинає більш віддалену частину межі клуба 2 від поверхні настилання.

У разі зустрічного потоку слід урахувати витікання потоку зі струмини у “завітряній” частині. Надамо обергального руху криволінійного відрізка $B_1 B_2$ зовнішньої межі струмини w разом з навколишнім потоком. Для цього слід знати профіль швидкості навколишнього потоку. Якщо прийняти, що навколишній потік

обертається подібно колесу (потенційна циркуляційна течія [10]), то ця швидкість лінійно зростає з відстанню до нескінченності, що в практиці систем забезпечення мікроклімату зустрічається рідко. Якщо зростання швидкості, м/с, більш повільне, відсутнє або швидкість, м/с, спадає, то течія стає зувною, що більш характерно для приміщень та апаратів забезпечення мікроклімату. Приймаємо

$$u_b = U(y_b/R) = U(B(\varphi)), \text{ м/с.} \quad (22)$$

Ділимо криволінійний відрізок B_1B_2 на елементарні відрізки $\Xi\Lambda$, кривиною яких можна знехтувати (рис. 3). Кожен такий відрізок за нескінченно малий час $d\tau$, с, переміщується на відстань $|\Gamma\Xi| = u_b d\tau$. Відрізок $\Xi\Lambda$ при русі описує нескінченно малу фігуру $\Gamma\theta\Lambda\Xi$, що прямує до паралелограма з висотою $|\Xi\Xi_{\theta\Lambda}| = dy_b$, м. Площа паралелограма $d^2A_m = |\Gamma\Xi| |\Xi\Xi_{\theta\Lambda}| = u_b d\tau dy_b$, м². Тоді площа фігури $B_1''B_2''B_2B_1$ дорівнює з урахуванням формули (22)

$$dA_m = R \left(\int_{B(\varphi_1)}^{B(\varphi_1+\Delta\varphi_{12})} U(B) dB \right) d\tau, \text{ м/с.} \quad (23)$$

Частинні випадки рівняння (23):

- циркуляційна течія

$$U(B) = U(B(\varphi_1))((y/R) + 1) / (B(\varphi_1) + 1):$$

$$\int_{B(\varphi_1)}^{B(\varphi_1+\Delta\varphi_{12})} U(B) dB = \frac{1}{2} \frac{U(B(\varphi_1))}{B(\varphi_1) + 1} \times \left((B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) + 1)^2 - (B(\varphi_1) + 1)^2 \right), \text{ м/с.} \quad (24)$$

- течія з рівномірним профілем швидкості $U(y) = u_b = \text{const}$:

$$\int_{B(\varphi_1)}^{B(\varphi_1+\Delta\varphi_{12})} U(B) dB = u_b (B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12}) - B(\varphi_1)), \text{ м}^2. \quad (25)$$

Площа зовнішньої частини міжклубного шару між лініями 1' та 1'' з урахуванням рівнянь (8), (10) і (11)

$$dA_c = |B_1J_{12}| dx_\Delta = R \frac{B^2(\varphi_1)}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \times \left(1 \pm \frac{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})}{2 \pm B(\varphi_1)} \right) \Delta w_1 d\tau, \text{ м}^2. \quad (26)$$

Миттєва обергальна швидкість центра клуба 1 з урахуванням з урахуванням того, що радіус клубів становить $R_i = y_o = y_b/2$, м:

$$\frac{d\varphi_1}{d\tau} = \frac{w_1}{R \pm y_o} = \frac{w_1}{R \pm \frac{RB(\varphi_1)}{2}} = \frac{2w_1}{R(2 \pm B(\varphi_1))}, \text{ с}^{-1}. \quad (27)$$

Рівняння балансу:

$$dA_c = dA_\Sigma + (dA_m) = \left(\frac{dA_\Sigma}{d\varphi_1} \frac{d\varphi_1}{d\tau} + \frac{dA_m}{d\tau} \right) d\tau, \text{ м}^2. \quad (28)$$

Після перетворень матимемо

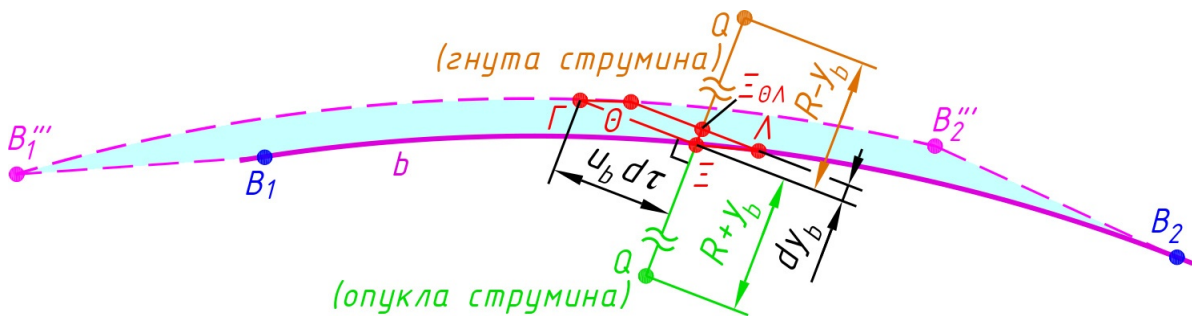


Рис. 3. Елементарна площа витікання зустрічного потоку: **зелений колір** – опукла струмина; **коричневий колір** – гнута струмина

$$B^2(\varphi_1) \left(\frac{2}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \pm 1 \right) \frac{\Delta w_1}{w_1} =$$

$$= 2 \frac{dA_\Sigma}{R^2 d\varphi_1} +$$

$$+ \left\{ (2 \pm B(\varphi_1)) \frac{1}{w_1} \left(\int_{B(\varphi_1)}^{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} U(B) d B \right) \right\}. \quad (29)$$

Член у фігурних дужках рівнянь (28) і (29) ураховується лише за наявності зустрічного потоку. Множимо рівняння (29) на $d\varphi_1$ та інтегруємо від початкового значення кута φ_1 до поточного значення $\varphi_{1,i}$. Отримуємо інтегральну форму балансового рівняння, що має більшу обчислювальну стійкість:

$$\int_{\varphi_{1,0}}^{\varphi_{1,i}} B^2(\varphi_1) \left(\frac{2}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \pm 1 \right) \frac{\Delta w_1}{w_1} d\varphi_1 =$$

$$= 2 \left(\frac{dA_\Sigma}{R^2} \Big|_{\varphi_{1,i}} - \frac{dA_\Sigma}{R^2} \Big|_{\varphi_{1,0}} \right) +$$

$$+ \left\{ \int_{\varphi_{1,0}}^{\varphi_{1,i}} (2 \pm B(\varphi_1)) \frac{1}{w_1} \left(\int_{B(\varphi_1)}^{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} U(B) d B \right) d\varphi_1 \right\}. \quad (30)$$

Для струмини можна з певною точністю припустити сталість відношення $\Delta w_1 / w_1$. В останньому члені рівняння (30) застосовуємо рівняння кількості руху для перерахунку на початкову швидкість підтікання до струмини $w_{1,0} = w_1(\varphi_{1,0})$:

$$\frac{\Delta w_1}{w_1} \int_{\varphi_{1,0}}^{\varphi_{1,i}} B^2(\varphi_1) \left(\frac{2}{B(\varphi_1) + B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} \pm 1 \right) d\varphi_1 =$$

$$= 2 \left(\frac{dA_\Sigma}{R^2} \Big|_{\varphi_{1,i}} - \frac{dA_\Sigma}{R^2} \Big|_{\varphi_{1,0}} \right) +$$

$$+ \left\{ \frac{1}{w_{1,0} B(\varphi_{1,0})} \int_{\varphi_{1,0}}^{\varphi_{1,i}} B(\varphi_1) (2 \pm B(\varphi_1)) \times \right.$$

$$\left. \times \left(\int_{B(\varphi_1)}^{B(\varphi_1 + \Delta\varphi_{12})} U(B) d B \right) d\varphi_1 \right\}. \quad (31)$$

Підходи до розв'язання рівнянь. Для розв'язання рівняння (31) використано систему чисельної алгебри SciLab. Рівняння (29) не є

звичайним диференціальним рівнянням. Умовами однозначності є не тільки початкові умови на виході струмини, але й форма кривої між найближчим до виходу клубом і наступним клубом для інтегрування. Лінійна функція є лише частинним випадком, тому приймається найбільш проста криволінійна апроксимація – квадратична парабола $B(\varphi) = a_2 \varphi^2 + a_1 \varphi + a_0$, задана

- значенням B_1 функції B у куті φ_1 центра клубу 1 біля виходу зі щілини,
- значенням B_2 функції B у куті φ_2 центра наступного клубу 2, дотичного до клубу 1,
- значенням B_1' похідної функції $dB/d\varphi$ у куті φ_1 .

Для найбільш ефективного розрахунку використано вбудовану функцію `interp`. Ця функція розраховує кубічну параболу за кінцевими точками та похідними у них. Для квадратичної параболи значення похідної при куті φ_2 отримується шляхом запису квадратичної функції за вищенаведеними умовами та її диференціювання:

$$B_2' = 2 \frac{B_2 - B_1}{\Delta\varphi_{12}} - B_1', \text{ м}^2. \quad (32)$$

Розв'язання виконано на сітці, що має перші два вузли в кутах φ_1 і φ_2 , а інші вузли розташовані рівномірно з кроком $\Delta\varphi$. Значення B_2 та B_1' визначалися за умови, щоб два клуби з центрами в наступних вузлах сітки давали ту ж квадратичну параболу. Якщо ж клуб у четвертому вузлі не може давати ту ж параболу, значення похідної B_1' приймалося для забезпечення мінімального за модулем відхилення від неї.

Подальші розрахунки здійснювалися за умови лінеаризації межі струмини між усіма вузлами сітки, крім перших двох. Це унеможливило паразитні осциляції функції. Для отримання достатньої точності приймається дрібний крок сітки, а саме, $\pi/400$ (0,5 Град або 0,45°). Зниження кроку удвічі практично не змінює результату криву.

При розв'язанні рівнянь через різноманітну поведінку функцій рівнянь необхідно виконувати відокремлення кореня. Убудована функція `fsolve` приймає лише одне початкове наближення і не гарантує, що розрахунок значення функції обмежуватиметься знайденим інтервалом відокремлення кореня. Тому використано обмежені чисельні методи. Для даної задачі шляхом перебору різних методів було прийнято метод Андерсона-Бйорка [14]. Кожне наступне наближення визначається лінійною інтерполяцією між межами проміжку відокремлення

кореня. Цим наближенням замінюється та межа проміжку, де нев'язка рівняння має той же знак, що й у новому наближенні. Якщо таким чином двічі підряд переміщено одну й ту ж межу, на наступній ітерації $i+1$ перед інтерполяцією значення нев'язки $EQ_{fix,i+1}$ на цій межі множитья на поправку

$$m = 1 - (EQ_i/EQ_{float,i}), \quad (33)$$

де EQ_i – нев'язка рівняння в новому наближенні на попередній ітерації i , а $EQ_{float,i}$ – нев'язка рівняння на попередній ітерації i на тій межі, яка була пересунута.

Якщо поправка m за Андерсоном-Бйорком від'ємна, то метод передбачає використання поправки алгоритму Illinois, а саме, $m = 1/2$. Оскільки стаття [15] є у вільному доступі, в даній роботі детальний огляд алгоритму не наведений. У цей метод були внесені модифікації задля швидкого й ефективного розв'язання даної задачі.

По-перше, як показала практика розв'язання даної задачі, поправка $m = 1/2$ не завжди забезпечує зміну межі проміжку відокремлення кореня, що пересувається. Це стосується випадків, коли з одного боку кореня функція змінюється дуже повільно. Виникає довге зациклення процесу. Тому в даному роботі, якщо $m < 0$, виконується наступна ітерація половинного ділення.

По-друге, після визначення кожного наступного наближення виконується перевірка розташування його суворо між межами проміжку відокремлення кореня. Для половинного ділення має бути достатньою умова, що нове наближення не збігається з жодною межею. Збіг нового наближення з межею або вихід за межі означає, що обчислювальні похибки сумірні з довжиною проміжку. Якщо це сталося на ітерації Андерсона-Бйорка, то всі подальші ітерації виконуються половинним діленням, яке найбільш стійке до обчислювальних похибок. Якщо ж це сталося на ітерації половинного ділення, значить, проміжок відокремлення кореня стягнуто до двох сусідніх чисел у комп'ютерному поданні. Подальше просування неможливе, тому обирається та межа проміжку, на якій нев'язка менша. Такий підхід корисний для будь-яких методів розв'язання рівнянь за відомими межами проміжку відокремлення кореня, якщо необхідна похибка може бути задана довільно малою або можливі значні обчислювальні похибки розрахунку нев'язки рівняння. Задання нульової похибки обчислень не

приведе до зависання алгоритму, а надасть максимально точне значення результату.

Інтегрування між вузлами сітки ϕ_1 і ϕ_2 відбувається шляхом рівномірного ділення цього проміжку на елементарні проміжки з кроком, найближчим меншим до $\Delta\phi$. Між іншими вузлами ділення не виконувалося. Інтегрування на кожному елементарному проміжку відбувалося за квадратурою Гауса-Лежандра [16] за вісьмома вузлами. Дані щодо ваги та вузлів взято зі спеціалізованої сторінки для розробників програмного забезпечення "Gaussian Quadrature Weights and Abscissae" [17]. Наведені особливості процесу розрахунку дозволили отримати чисельні розв'язки меж струмини при різній кривині поверхні настилання.

Результати розрахунків. Результати розрахунків напівобмежених струмин (рис. 4) показують, що опуклі струмини спочатку розвиваються з практично однаковим темпом розширення. У певному перерізі виникає криза з раптовим розширенням струмини і пришвидшення подальшого темпу розширення. Звичайно, різкий характер виникає через спрощення моделі, а саме, не врахування додаткового підтікання середовища за рахунок впливу розрідження в струміні. Далі розрахунки показують звуження струмини, що свідчить про відрив. Програма автоматично припиняє розрахунок при виявленні звуження струмини.

Дослідні дані за [9] добре збігаються з розрахунковими на початку розвитку струмини. Біля кризового кута, звичайно, відбувається де-що більш плавне розширення.

Збільшення початкової ширини, m , струмини порівняно з радіусом, m , поверхні настилання призводить до подовження ділянки малого темпу розширення струмини. З урахуванням рівняння кількості руху це означає малий темп затухання швидкості, m/c , струмини. Однак, подальше розширення струмини зі зростанням початкової ширини є більш швидким.

Візуальне дослідження опуклої напівобмеженої струмини (рис. 5) підтверджує правильність спрощеної макроструктури на рис. 1. Тонкі струмини відриваються від опуклої поверхні (рис. 4) після проходження значно меншого кута (менше 45°), ніж для струмини при $V(\phi=0) > 0,15 \dots 0,2$ (рис. 4). Отже, повітророзподільники з опуклою поверхнею настилання повинні мати ширину щілини, m , не менше $0,15 \dots 0,2$ радіуса цієї поверхні, m .

Гнуті струмини мають малий темп розширення протягом усього розвитку. Це означає малий темп затухання. Такі струмини є більш далекобійними, ніж опуклі.

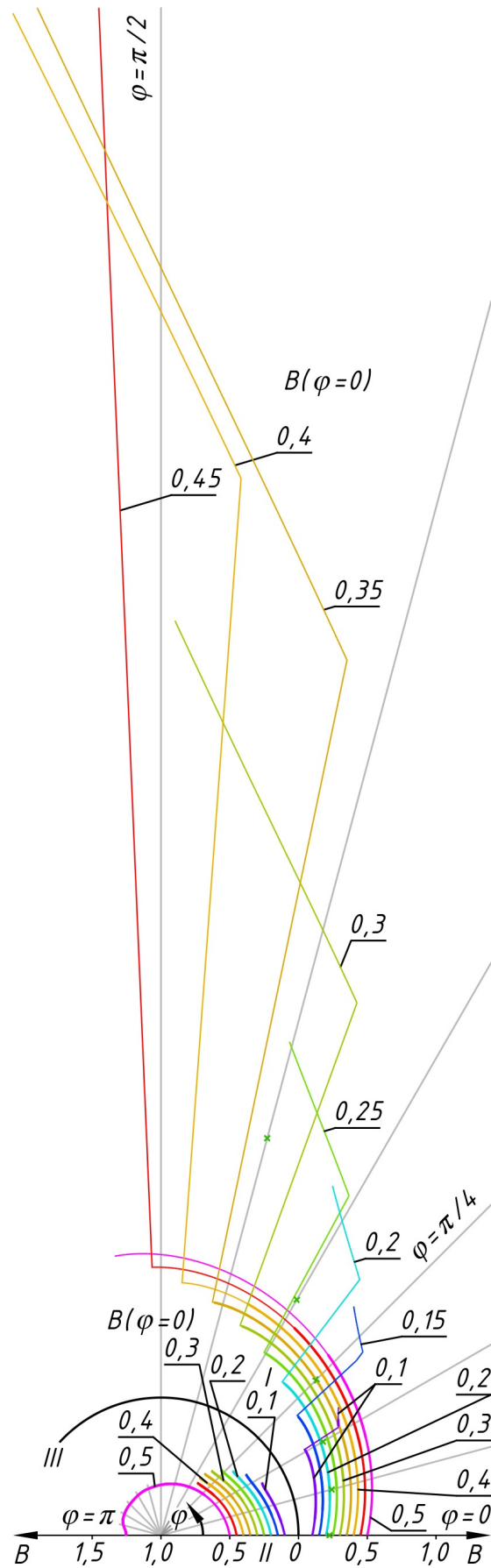


Рис. 4. Результати розрахунків криволінійних напівобмежених струмін:
 I – опуклих; II – гнутих; III – поверхня настилення ($B = 0$);

× – дослідні дані автора при початковому значенні $B(\varphi=0) \approx 0,23$ з урахуванням вторинного потоку

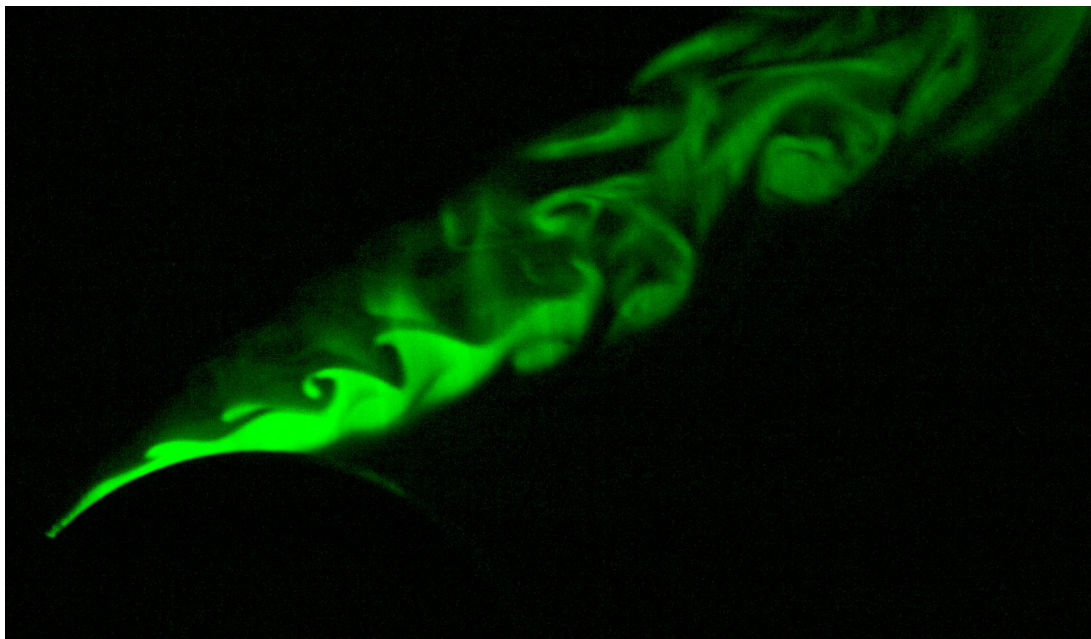


Рис. 5. Розріз струмини слабого розчину ураніну фіолетовим плоским лазерним променем

Отримані результати дозволяють за допомогою геометричного та кінематичного аналізу макроструктури криволінійних напівобмежених струмин передбачити основні закономірності розвитку таких струмин залежно від відносної початкової її ширини для задач формування мікроклімату приміщень.

Висновки. Отримані результати геометричного та кінематичного аналізу макроструктури плоских напівобмежених струмин добре збігаються з експериментальними даними. Після випуску струмини мають малий темп розширення та затухання. Далі відбувається криза зі швид-

ким розширенням струмини. Кризовий кут залежить від відношення початкової ширини струмини, м, до радіуса поверхні настилення, м. Експериментальні дані добре збігаються з результатами розрахунку, однак біля кута, де відбувається криза, дослідне розширення струмини більш плавне. Результати показують, що повітророзподільники з опуклою поверхнею повинні мати ширину щілини, м, не менше $0,15 \dots 0,2$ радіуса поверхні настилення, м. Візуальні дослідження струмин підтверджують правильність подання струминного примежового шару як пелени клубів.

Література

1. Procédé et dispositif pour la diffusion de l'air ou d'autres fluide: Пат. 724.614 Франція, Gr.15.–Cl.4; Société anonyme: Applications mécanique et thermique résidant en Belgique. Опубл. 29.04.1932.
2. Кляйнерт В. Трубні вентиляційні системи / В. Кляйнерт // Ринок інсталяцій. – 2002. – №VI. – С. 8-10.
3. Повітророзподільник: Пат. 44971 Україна: МПК 6 F 24 F 13/06. А. Я. Ткачук, В. О. Мілейковський. опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3.
4. Повітророзподільник: Пат. 73805 Україна МПК 7 F 24 F 13/06. В. Б. Довгалюк, В. О. Мілейковський, О. М. Кібеко, В. І. Шенгелевич. опубл. 15.09.2005, Бюл. №22.
5. Повітророзподільник: Пат. 73818 Україна МПК 7 F 24 F 13/06. В. Б. Довгалюк, В. О. Мілейковський, О. М. Кібеко, В. І. Шенгелевич. опубл. 15.09.2005, Бюл. №22.
6. Довгалюк В. Б. Розрахункова модель неізотермічної струмини, що настається на опуклу циліндричну поверхню / В. Б. Довгалюк, В. О. Мілейковський // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 12. – С. 11-32. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/03/VOTGP_2008_12.pdf
7. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинні від 01.01.2014. – Київ: Укрархбудінформ, 2013. – V, 141 с. URL: http://interiorfor.com/wp-content/uploads/2017/01/DBN_V.2.5-67_2013.pdf
8. Алямовский А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарёв. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
9. Довгалюк В. Б. Формування струмин при тангенціальних випусках повітря з повітророзподільника / В. Б. Довгалюк, В. О. Мілейковський // Нова тема. – 2007. – № 2. – С. 22-24. URL: http://aesetua.com/wp-content/uploads/2017/05/Nova_Tema_2-2007.pdf

10. Довгалиук В. Б. Аеродинаміка вентиляції: Навчальний посібник / В. Б. Довгалиук. – Київ: ІВНВКП «Укреліотех», 2015. – 366 с.
11. Mileikovskiy V. The Geomtrical Analysis of Structure of the Semibounded Currents / V. Mileikovskiy // Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secțiunea 5 Construcții de Mașini. – 2011. – Vol. 57. – Iss. 3. – pp. 203-210
12. Mileikovskiy V. Geometrical Modelling of Semi-Bounded Curvilinear Currents / V. Mileikovskiy // 3rd International Scientific Conference moNGeometrija 2012: Serbia, Novi Sad, June 21st–24th 2012. – Proceedings. – P. 189-197.
13. Dovhaliuk V. Simplified Analysis of Turbulence Intensity in Curvilinear Wall Jets / V. Dovhaliuk, O. Gumen, V. Mileikovskiy, V. Dziubenko // FME Transactions. – 2018. – No 2(46). – P. 177-182. <https://doi.org/10.5937/fmet1802177D>.
14. Galdino S. A family of regula falsi root-finding methods / S. Galdino // Proceedings of 2011 World Congress on Engineering and Technology (CET 2011). – 2011. – Vol. 1. – P. 514-517.
15. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – Москва: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
16. Dirk P. Laurie. Computation of Gauss-type quadrature formulas / P. Dirk // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2001. – Vol. 127. – Iss. 1–2. – P. 201-217. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00506-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00506-9)
17. Mike "Pomax" Kamermans. Gaussian Quadrature Weights and Abscissae. URL: <https://pomax.github.io/bezierinfo/legendre-gauss.html>

References

1. Procédé et dispositif pour la diffusion de l'air ou d'autres fluide: Pat. 724.614 Frances, Gr.15.–Cl.4; Société anonyme: Applications mécanique et thermique résidant en Belgique. Оpubл. 29.04.1932.
2. Кляйнерт В. Трубні вентиляційні системи. *Ринок інсталяцій*. 2002. 04/рік VI. С. 8-10.
3. Tkachuk A. Ya., Mileikovskiy V. O. "Povitrorozpodilnyk." Patent of Ukraine 44971. 15 March 2002.
4. Dovhaliuk V. B., Mileikovskiy V. O., Kibeko O. M., Shenhelevych V. I. "Povitrorozpodilnyk." Patent of Ukraine 73805. 15 September 2005.
5. Dovhaliuk V. B., Mileikovskiy V. O., Kibeko O. M., Shenhelevych V. I. "Povitrorozpodilnyk." Patent of Ukraine 73818. 15 September 2005.
6. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. "Rozrachunkova model neizotermichnoi strumyny, sgcho nastylaetsia na opuklu tsylindryghnu poverkhniu." *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 12, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2008, pp. 11-32. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/03/VOTGP_2008_12.pdf
7. *Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia*. DBN V.2.5-67:2013, Ukrarkhbudinform, 2013. URL: http://interiorfor.com/wp-content/uploads/2017/01/DBN_V.2.5-67_2013.pdf
8. Aliamovskii A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. Y., Ponomarev N. B. *SolidWorks 2007/2008. Kompiuternoe modelirovanie v inzhenernoq praktike*. BKHV-Peterburg, 2008. – 1040 p.
9. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. "Formuvannia strumyn pry tanhentsialnykh vypuskakh povitria z povitrorozpodilnyka." *Nova tema*. 2007. № 2. P. 22-24.
10. Dovhaliuk V. B. Aerodynamika ventyliatsii. IVNVKP "Ukrheliotech", 2015. 366 p.
11. Mileikovskiy V. "The Geomtrical Analysis of Structure of the Semibounded Currents." *Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secțiunea 5 Construcții de Mașini*. 2011. Vol. 57. Iss. 3. P. 203 – 210.
12. Mileikovskiy V. "Geometrical Modelling of Semi-Bounded Curvilinear Currents." *3rd International Scientific Conference moNGeometrija 2012: Serbia, Novi Sad, June 21st–24th 2012*. Proceedings. P. 189-197.
13. Dovhaliuk V., Gumen O., Mileikovskiy V., Dziubenko V. "Simplified Analysis of Turbulence Intensity in Curvilinear Wall Jets." *FME Transactions*. 2018. No 2(46). P. 177-182. <https://doi.org/10.5937/fmet1802177D>.
14. Galdino S. "A family of regula falsi root-finding methods." *Proceedings of 2011 World Congress on Engineering and Technology (CET 2011)*. 2011. Vol. 1. P. 514-517.
15. Abramovich G. N. *Teoriia turbulentnykh strui*. EKOLIT, 2011. 720 p.
16. Dirk P. "Laurie. Computation of Gauss-type quadrature formulas." *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2001. Vol. 127, Iss. 1–2. P. 201-217. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00506-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00506-9)
17. Mike "Pomax" Kamermans. Gaussian Quadrature Weights and Abscissae. URL: <https://pomax.github.io/bezierinfo/legendre-gauss.html>

УДК 697.92

Аналитическое описание расширения полуограниченных струй различной кривизны

В. А. Милейковский¹

¹к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, v_mil@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8543-1800

Аннотация. Работа посвящена аналитическому исследованию расширения струй, настилающихся на выпуклую и вогнутую поверхности (криволинейных полуограниченных струй). Такие струи имеют различные характеристики в зависимости от кривизны поверхности - от дальнобойных до быстрозатухающих. Это делает их одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности организации воздухообмена в помещениях различного назначения. Однако, на сегодняшний день они не получили широкого внедрения, что связано с нестабильностью развития струи. Проблема устраняется использованием правильной формы канала для выпуска воздуха. Для определения расширения струи разработан подход к аналитическому описанию криволинейных полуограниченных струй путём геометрического анализа их турбулентной макроструктуры. Эта структура представляется в виде пелены касающихся крупномасштабных вихрей (клубов). Для эффективного решения полученных уравнений был скорректирован метод Андерсона-Бьорка. Полученные результаты показывают слабое расширение гнутых струй и значительно более быстрое - для выпуклых. Расчёты показали наличие критического сечения с быстрым расширением выпуклой струи и последующим повышенным темпом её расширения. Также получено сечение отрыва струи. Если ширина щели меньше 0,15...0,2 радиуса поверхности настилания, то угол прохождения струи значительно уменьшается, что уменьшает расширение струи и усложняет конструкцию разработанных на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Киевского национального университета строительства и архитектуры многоцелевых воздухораспределителей.

Ключевые слова: полуограниченная струя, турбулентная струя, теория струй, организация воздухообмена, турбулентная макроструктура.

UDC 697.92

Analytical description of the expansion of wall jets of different curvature

V. Mileikovskiy¹

¹PhD., Associate Professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, mileikovskiy@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-8543-1800

Abstract. The work is devoted to an analytical study of the expansion of wall jets on a convex and concave surfaces (curved semi-limited jets). Such jets have different characteristics depending on the curvature of the surface - from long-range to fast-decay. This makes them one of the most promising areas of increasing the efficiency of air exchange in rooms for various purposes. However, today they have not widespread introduction, which is because of the instability of the development of the jets. The problem is eliminated by using the correct shape of the air outlet duct. To determine the expansion of the jet, an approach has been developed to the analytical description of curved wall jets using the geometric analysis of their turbulent macrostructure. This structure is represented in the form of a sheet of tangent large-scale vortices (puffs). To effectively solve the obtained equations, the Anderson-Björk method was improved. The results show a slight expansion of concave jets and much faster for convex ones. Calculations showed the presence of a critical section with the rapid expansion of a convex jet and the subsequent increased rate of its expansion. Also, a cross section for separation of the jet is obtained. If the slot width is less than 0.15 ... 0.2 of the radius of the wall, then the angle of passage of the jet is significantly reduced, which reduces the expansion of the jet and complicates the design of the multi-slot air distributors developed at the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation of Kiev National University of Construction and Architecture.

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

Надійшла до редакції / Received 6.03.2019

ПРИВІТ!



Для дому



Для квартири



Для офісу

Я припливно-витяжна установка з рекуперацією тепла

ВУТ 270 В5Б ЕС



Установки обробки повітря являють собою повністю завершені вентиляційні агрегати з утилізацією тепла, які забезпечують фільтрацію повітря, подавання свіжого, а також видалення забрудненого повітря.

Тепло, що міститься у витяжному повітрі, використовується для нагрівання припливного повітря у високоефективному пластинчастому рекуператорі.

Установки призначені для використання в якості енергоефективного рішення для вентиляції та опалення приватних будинків та квартир і сумісні з повітропроводами круглого перерізу діаметром 125 мм.

Корпус виготовлений зі спіненого поліпропілену (EPP), який має високі тепло- та звукоізоляційні властивості.



Працюють
тихо



Зберігаю
тепло



Провітрю
приміщення



Економлю
бюджет



Споживаю мало
електроенергії



Очищую
повітря

УДК 628.8

Моделювання надійності технічного стану теплонасосної установки з використанням системи нечітких логічних рівнянь лінгвістичних змінних

Г. С. Ратушняк¹, О.Г. Лялюк², Д. А. Шпіта³

¹к.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, ratusnak@gmail.com
ORCID 0000-0001-9656-5150

²к.т.н., доц. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, Lyalyuk74@gmail.com
ORCID 0000-0001-6446-9244, Lyalyuk74@gmail.com

³аспірант. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, shpitadima@gmail.com
ORCID 0000-0001-9811-6340

Анотація. З метою створення експертно-моделювальної системи для багатофакторного аналізу процесу накопичення факторів, що впливають на технічний стан теплового насоса, був використаний математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної. Цей метод як взаємопов'язана сукупність математичних моделей дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для прогнозування технічного стану теплового насоса залежно від факторів, що його обумовлюють. Виконано оцінку рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між факторами, які впливають на технічний стан теплових насосів, з використанням системи терм-множини. Побудовано нечіткі матриці знань з урахуванням уведених якісних термів та складено лінгвістичні висловлювання, що відповідають системі нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами.

Ключові слова: моделювання, теплонасосні установки, прогнозований технічний стан, лінгвістичні змінні, фактори впливу

Вступ. Зростання споживання енергоносіїв та ускладнення екологічних наслідків при спалюванні палива для отримання теплової енергії потребує впровадження енергоощадних систем теплопостачання. Сучасна державна політика України спрямована на підвищення енергоощадності шляхом використання відновлювальних альтернативних джерел теплової енергії [1]. Досвід економічно розвинутих країн свідчить про позитивні наслідки використання різних джерел низькопотенційної теплоти теплонасосними установками для забезпечення необхідною тепловою енергією споживачів [2,3]. За експертними оцінками загальна кількість теплових насосів різної потужності у світі досягає близько 20 мільйонів. У США понад 30 % житлових будинків обладнано теплонасосними установками. Суттєво підвищити ефективність систем теплопостачання дозволяє використання теплонасосних установок, у яких джерелом низькопотенційної енергії є теплота Землі, що відбирається за допомогою теплообмінників, розміщених безпосередньо в ґрунті або водоносних горизонтах. Суттєвий вплив на надійність технічного стану теплонасосних установок (ТНУ) має значна сукупність кількісних та якісних чинників [4,5].

Актуальність дослідження. Отримання теплоенергетичних ресурсів з використанням теплонасосних установок, що перетворюють низькопотенційну теплоту ґрунтових вод на

придатну до споживання, є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії. Експлуатаційна надійність ТНУ визначається науково-технічним рівнем проектних рішень, якістю будівельно-монтажних робіт та умовами експлуатації. Комплекс цих факторів характеризується кількісними та якісними величинами, що є визначальними при забезпеченні здатності ТНУ виконувати покладені на неї функції передачі теплової енергії від низькопотенційного джерела до споживача з більш високою температурою в заданих режимах та умовах застосування.

Останні дослідження та публікації. Аналіз надійності систем теплопостачання з використанням теплових насосів присвячені дослідження А. О. Редька, М. К. Безродного, М. В. Загорученко, О. Ф. Редька, Г. С. Ратушняк, М. Г. Хмелюка та ін. [3, 6]. В розробках М. К. Безродного та Н. О. Притули [12] розглядається оптимальна робота теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунту.

Формулювання мети дослідження. Мета роботи полягає в обґрунтуванні можливості експертно-аналітичного оцінювання надійності технічного стану теплонасосної установки, яка використовує ґрунтові води як джерело низькопотенційної теплоти. Для цього використано основні теоретичні положення нечіткої логіки та лінгвістичних змінних.

Основна частина. Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, які впливають на технічний стан теплового насоса, виконано їхню класифікацію [3, 13]. Використаємо на системному рівні лінгвістичну змінну $A_{СТН}$, що характеризує вплив сукупності факторів на надійність технічного стану теплового насоса. Її можна представити у вигляді раніше встановленого співвідношення, яке наведено в роботі [13]

$$A_{СТН} = f(X; Y; Z), \quad (1)$$

де X – лінгвістична змінна, яка описує науково-технічний рівень проектних рішень; Y – лінгвістична змінна, що описує якість будівельно-монтажних робіт; Z – лінгвістична змінна, яка описує технічні умови експлуатації системи.

Лінгвістична змінна, яка описує науково-технічний рівень проектних рішень, може бути представлена виразом

$$X = f_x(x_1; x_2; x_3; x_4; x_5), \quad (2)$$

де x_1 – лінгвістична змінна “Помилки в визначенні розрахунку потужності теплового насоса”; x_2 – лінгвістична змінна “Конструктивне виконання схем теплового насоса”; x_3 – лінгвістична змінна “Відхилення технічних характеристик теплового насоса від паспортних даних”; x_4 – лінгвістична змінна “Принцип роботи теплового насоса”; x_5 – лінгвістична змінна “Автоматизація та диспетчеризація управління частинами теплового насоса”.

Лінгвістична змінна, що описує якість будівельно-монтажних робіт, може бути представлена виразом

$$Y = f_y(y_1; y_2; y_3; y_4), \quad (3)$$

де y_1 – лінгвістична змінна “Механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі комплектуючих системи”; y_2 – лінгвістична змінна “Відхилення від глибини закладання колекторів теплового насоса”; y_3 – лінгвістична змінна “Відхилення від проміжної відстані між колекторами теплового насоса”; y_4 – лінгвістична змінна “Дотримання правил та чинних норм під час виконання будівельно-монтажних робіт”.

Лінгвістична змінна, що описує технічні умови експлуатації теплових насосів, представлена виразом

$$Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5), \quad (4)$$

де z_1 – лінгвістична змінна “Потрапляння сміття (іржі) у випарник під час експлуатації або затоплення теплового насоса”; z_2 – лінгвістична змінна “Мінералізація води, яку використовує система теплового насоса”; z_3 – лінгвістична змінна “Кваліфікаційний рівень персоналу”; z_4 – лінгвістична змінна “Якість міжремонтних та ремонтних заходів”; z_5 – лінгвістична змінна “Дотримання чинних норм та правил під час експлуатації”.

У вираз (2) входять змінні x_2 та x_4 , які в свою чергу залежать від інших факторів

$$x_2 = f_{x_2}(a_1; a_2; a_3), \quad (5)$$

$$x_4 = f_{x_4}(b_1; b_2), \quad (6)$$

де a_1 – лінгвістична змінна “Горизонтальна схема замкнутого типу”; a_2 – лінгвістична змінна “Вертикальна схема замкнутого типу”; a_3 – лінгвістична змінна “Водна схема замкнутого типу”; b_1 – лінгвістична змінна “Компресійні теплові насоси”; b_2 – лінгвістична змінна “Абсорбційні теплові насоси”.

Моделювання інтелектуальної підтримки оцінювання технічного стану теплового насоса на системному рівні здійснюватиметься за допомогою наступних термів:

- $T(A_{СТН}) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle$;
- $T(X) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$;
- $T(Y) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$;
- $T(Z) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$.

Нечітка матриця знань з урахуванням уведених якісних термів для моделювання залежності наведена в табл. 1.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 1, відповідає система нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності оцінювання технічного стану теплового насоса за даним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(A_{СТН}) &= \mu_H(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \\ &\vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \\ &\vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z); \end{aligned} \quad (7)$$

Матриця знань для залежності, що характеризує технічний стан теплового насоса

ЯКЩО			ТО
Науково-технічний рівень проектних рішень (X)	Якість будівельно – монтажних робіт (Y)	Технічні умови експлуатації (Z)	Технічний стан теплового насоса (A _{стп})
Низькі (Н)	Нижче середніх(нС)	Низькі (Н)	Низький (Н)
Нижче середніх(нС)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	
Низькі (Н)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	
Нижче середніх(нС)	Нижче середніх(нС)	Середні (С)	Нижче середнього (нС)
Нижче середніх(нС)	Середні (С)	Нижче середнього(нС)	
Низькі (Н)	Нижче середніх(нС)	Нижче середнього(нС)	
Нижче середніх(нС)	Середні (С)	Середні (С)	Середній (С)
Середні (С)	Середні (С)	Ниж середнього(нС)	
Середні (С)	Середні (С)	Вище середніх (вС)	
Нижче середніх(нС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середнього (вС)
Середні (С)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	
Високі (В)	Високі (В)	Вище середніх (вС)	Високий (В)
Вище середніх (вС)	Високі (В)	Високі (В)	
Високі (В)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(A_{CTH}) &= \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_H(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(A_{CTH}) &= \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(A_{CTH}) &= \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_B(Z); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(A_{CTH}) &= \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \\ &\vee \mu_B(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_B(Z); \end{aligned} \quad (11)$$

Моделювання оцінювання технічного стану теплового насоса на рівні проектних рішень виконується таким чином. Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язує науково-технічний рівень проектних рішень (X) з помилками визначення розрахункової потужності теплового насоса (X₁), конструктивного виконання схем (X₂), відхиленнями технічних характеристик теплового насоса від паспортних даних (X₃), принципу роботи теплового насоса (X₄), автоматизації та диспетчеризації управління частинами теплового насоса (X₅), виконується з

використанням системи терм-множин:

- T(X) = <низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі>;
- T(X₁) = <грубі, вище середніх, середні, нижче середніх, відсутні>;
- T(X₂) = <примітивна (пр), традиційна (тр), вдосконала(вд)>;
- T(X₃) = <низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі>;
- T(X₄) = <низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий >;
- T(X₅) = <відсутня, частково відсутня, присутня >.

Лінгвістичним висловлюванням у табл. 2 відповідає певна система нечітких логічних рівнянь, що характеризують дану поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(X) &= \mu_{\Gamma}(x_1) \wedge \mu_{\text{Пр}}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \wedge \mu_H(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_{\text{Тр}}(x_2) \wedge \mu_{nC}(x_3) \wedge \mu_{nC}(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{\text{Пр}}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \wedge \mu_H(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(X) &= \mu_{\Gamma}(x_1) \wedge \mu_{\text{Пр}}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \wedge \mu_H(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{\text{Тр}}(x_2) \wedge \mu_C(x_3) \wedge \mu_C(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{\text{Тр}}(x_2) \wedge \mu_{nC}(x_3) \wedge \mu_{nC}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(X) &= \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{\text{Тр}}(x_2) \wedge \mu_C(x_3) \wedge \mu_C(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ &\vee \mu_B(x_1) \wedge \mu_{\text{Тр}}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_{\text{Тр}}(x_2) \wedge \mu_{nC}(x_3) \wedge \mu_{nC}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5); \end{aligned} \quad (14)$$

Матриця знань для залежності, яка описує науково-технічний рівень проектних рішень

ЯКЩО					ТО
Помилки визначення розрахункової потужності теплового насоса (X_1)	Конструктивне виконання схем (X_2)	Відхилення реальних технічних характеристик теплового насоса від паспортних даних (X_3)	Принцип роботи теплового насоса (X_4)	Автоматизація та диспетчеризація управління теплового насоса (X_5)	Науково-технічний рівень проектних рішень (X)
Грубі (Г)	Примітивна (Пр)	Низькі (Н)	Низька (Н)	Відсутня (В)	Низькі (Н)
Нижче середнього (нС)	Традиційна (Тр)	Нижчі середнього (нС)	Нижча середнього (нС)	Відсутня (В)	
Вище середнього (вС)	Примітивна (Пр)	Низькі (Н)	Низька (Н)	Відсутня (В)	
Грубі (Г)	Примітивна (Пр)	Низькі (Н)	Низька (Н)	Відсутня (В)	Нижче середніх (нС)
Вище середнього	Традиційна (Тр)	Середні (С)	Середня (С)	Відсутня (В)	
Вище середнього (вС)	Традиційна (Тр)	Нижчі середнього (нС)	Нижча середнього (нС)	Частково відсутня (чВ)	
Нижче середнього (нС)	Традиційна (Тр)	Середні (С)	Середня (С)	Частково відсутня (чВ)	Середні (С)
Відсутні (Відс)	Традиційна (Тр)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Частково відсутня (чВ)	
Нижче середнього (нС)	Традиційна (Тр)	Нижчі середнього (нС)	Нижча середнього (нС)	Частково відсутня (чВ)	
Відсутні (Відс)	Традиційна (Тр)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Частково відсутня (чВ)	Вище середніх (вС)
Вище середнього (вС)	Вдосконалена (Вд)	Високі (В)	Висока (В)	Присутня	
Вище середнього (вС)	Вдосконалена (Вд)	Середні (С)	Середня (С)	Частково відсутня (чВ)	
Відсутні (Відс)	Вдосконалена (Вд)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Присутня (Пр)	Високі (В)
Вище середнього (вС)	Вдосконалена (Вд)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Частково відсутня (чВ)	
Відсутні (Відс)	Вдосконалена (Вд)	Високі (В)	Висока (В)	Присутня (Пр)	

$$\begin{aligned} \mu_{вС}(X) = & \mu_{В}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{В}(x_3) \wedge \mu_{В}(x_4) \wedge \mu_{Пр}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{С}(x_3) \wedge \mu_{С}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5); \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{в}(X) = & \mu_{Вілс}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{Пр}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{Вілс}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{В}(x_3) \wedge \mu_{В}(x_4) \wedge \mu_{Пр}(x_5); \quad (16) \end{aligned}$$

Нечітку матриця знань, яка враховує введені якісні терми для моделювання залежності конструктивних схем виконання теплового насоса, наведено в табл. 3. Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 3, за відповідним даним термом, є система рівнянь

$$\begin{aligned} \mu_{нез}(X_2) = & \mu_{Пр}(a_1) \wedge \mu_{Пр}(a_2) \wedge \mu_{Пр}(a_3) \vee \\ & \vee \mu_{Пр}(a_1) \wedge \mu_{Пр}(a_2) \wedge \mu_{Пр}(a_3); \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{мЗад}(X_2) = & \mu_{Тр}(a_1) \wedge \mu_{Тр}(a_2) \wedge \mu_{Тр}(a_3) \vee \\ & \vee \mu_{Тр}(a_1) \wedge \mu_{Тр}(a_2) \wedge \mu_{Тр}(a_3); \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{Зад}(X_2) = & \mu_{Вд}(a_1) \wedge \mu_{Вд}(a_2) \wedge \mu_{Вд}(a_3) \vee \\ & \vee \mu_{Вд}(a_1) \wedge \mu_{Вд}(a_2) \wedge \mu_{Вд}(a_3). \quad (19) \end{aligned}$$

Нечітку матриця знань, що враховує введення якісних термів для здійснення моделювання залежності від принципу роботи теплового насоса, наведено в табл. 4. Лінгвістичним висловлюванням з табл. 4 за відповідним даним термом є система рівнянь

$$\begin{aligned} \mu_{Н}(x_4) = & \mu_{Н}(b_1) \wedge \mu_{нС}(b_2) \vee \\ & \vee \mu_{нС}(b_1) \wedge \mu_{Н}(b_2); \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{С}(x_4) = & \mu_{С}(b_1) \wedge \mu_{С}(b_2) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(b_1) \wedge \mu_{вС}(b_2); \quad (21) \end{aligned}$$

Таблиця 3

Матриця знань для залежності конструктивних схем виконання теплового насоса

Горизонтальні схеми різних типів	ЯКЩО			ТО
	Горизонтальна схема (а ₁)	Вертикальна схема (а ₂)	Водна схема (а ₃)	Конструктивне виконання схем (Х ₂)
1	Примітивна(Пр)	Примітивна (Пр)	Примітивна (Пр)	Незадовільне (Нез)
2	Примітивна(Пр)	Примітивна (Пр)	Примітивна (Пр)	
3	Традиційна(Тр)	Традиційна (Тр)	Традиційна(Тр)	Менш задовільне (МЗ)
4	Традиційна(Тр)	Традиційна Тр)	Традиційна(Тр)	
5	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	Задовільне (З)
6	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	

Таблиця 4

Матриця знань для залежності принципу роботи теплового насоса

ЯКЩО		ТО
Компресійні теплові насоси (b ₁)	Абсорбційні теплові насоси (b ₂)	Принцип роботи теплового насоса (x ₄)
Низька (Н)	Нижча середнього (нС)	Низька (Н)
Нижча середнього (нС)	Низька (Н))	
Середня (С)	Середня (С)	Середня (С)
Вища середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Висока (В)
Висока (В)	Вища середнього (вС)	
Вища середнього (вС)	Висока (В)	

$$\mu_{b_1}(x_4) = \mu_{b_1}(b_1) \wedge \mu_{b_2}(b_2) \vee \mu_{b_2}(b_1) \wedge \mu_{b_1}(b_2). \quad (22)$$

Моделювання оцінювання технічного стану теплового насоса на рівні будівельно-монтажних робіт виконується таким чином. Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язує будівельно-монтажні роботи (Y) з механічними пошкодженнями при транспортуванні та монтажі комплектуючих систем теплових насосів (Y₁), контроль глибини закладання колекторів теплового насоса (Y₂), контроль проміжної відстані між колекторами теплового насоса (Y₃), дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт (Y₄) виконується з використанням системи терм-множин:

- T(Y) = <низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі>;
- T(Y₁) = <відсутні, частково відсутні, присутні>;
- T(Y₂) = <низька, нижче середнього, середня, вище середньої, висока>;
- T(Y₃) = <низька, середня, висока>;
- T(Y₄) = <низьке, нижче середнього, середнє, вище середнього, високе>.

Нечітка матриця знань з урахуванням якісних термів залежно від експлуатаційних показників теплового насоса наведено в табл. 5. Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 5, відповідає система рівнянь за даним відповідним термом:

$$\mu_{n_1}(Y) = \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee$$

$$\mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4); \quad (23)$$

$$\mu_{n_1}(Y) = \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee \mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4) \vee \mu_{n_3}(Y_1) \wedge \mu_{n_4}(Y_2) \wedge \mu_{n_1}(Y_3) \wedge \mu_{n_2}(Y_4); \quad (24)$$

$$\mu_{n_2}(Y) = \mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4) \vee \mu_{n_3}(Y_1) \wedge \mu_{n_4}(Y_2) \wedge \mu_{n_1}(Y_3) \wedge \mu_{n_2}(Y_4) \vee \mu_{n_4}(Y_1) \wedge \mu_{n_1}(Y_2) \wedge \mu_{n_2}(Y_3) \wedge \mu_{n_3}(Y_4); \quad (25)$$

$$\mu_{n_3}(Y) = \mu_{n_3}(Y_1) \wedge \mu_{n_4}(Y_2) \wedge \mu_{n_1}(Y_3) \wedge \mu_{n_2}(Y_4) \vee \mu_{n_4}(Y_1) \wedge \mu_{n_1}(Y_2) \wedge \mu_{n_2}(Y_3) \wedge \mu_{n_3}(Y_4) \vee \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4); \quad (26)$$

$$\mu_{n_4}(Y) = \mu_{n_4}(Y_1) \wedge \mu_{n_1}(Y_2) \wedge \mu_{n_2}(Y_3) \wedge \mu_{n_3}(Y_4) \vee \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee \mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4); \quad (27)$$

Висновки. Виконаний аналіз та оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між факторами, які впливають на технічний стан теплових насосів з використанням системи терм-множини, дозволив побудувати нечіткі матриці знань з урахуванням уведених якісних термів та скласти лінгвістичні висловлювання, які відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами.

Матриця знань в залежності від експлуатаційних показників теплового насоса

Механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі (Y ₁)	ЯКЩО			ТО
	Контроль відхилення глибини закладання колекторів теплового насоса (Y ₂)	Контроль відхилення проміжної відстані між колекторами (Y ₃)	Дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт (Y ₄)	Експлуатаційні показники (Y)
Присутні (П)	Нижче середнього (нС)	Низька (Н)	Нижче середнього (нС)	Низькі (Н)
Присутні (П)	Низький (Н)	Низька (Н)	Низький (Н)	
Частково присутні (чП)	Низький (Н)	Середня (С)	Низький (Н)	
Присутні (П)	Нижче середнього (нС)	Низька (Н)	Нижче середнього (нС)	Нижче середніх (нС)
Частково п.(Пр)	Середній(С)	Середня (С)	Середній(С)	
Присутні (П)	Низький (Н)	Середня (С)	Низький (Н)	
Частково присутні (чП)	Нижче середнього (нС)	Висока (В)	Нижче середнього (нС)	Середні (С)
Відсутні (В)	Середній (С)	Середня (С)	Середній (С)	
Частково присутні (чП)	Вище середнього (вС)	Середня (С)	Вище середнього (вС)	
Відсутні (В)	Вище середнього (вС)	Висока (В)	Вище середнього (вС)	Вище середніх (вС)
Відсутні (В)	Середній (С)	Середня (С)	Середній (С)	
Частково присутні (чП)	Високий (В)	Висока (В)	Високий (В)	
Відсутні (В)	Високий (В)	Висока (В)	Високий (В)	Високі (В)
Відсутні (В)	Високий (В)	Середня (С)	Високий (В)	
Відсутні (В)	Вище середнього (вС)	Висока (В)	Вище середнього (вС)	

Перспективи подальших досліджень. У подальшому доцільне проведення натурального експерименту для уточнення експертних

значень лінгвістичних змінних, що впливають на параметри функціонування теплових насосів.

Література

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України. – НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. – Київ, 2005. – 45 с.
2. Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики та рекомендації по екологізації паливно-енергетичного комплексу України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnogo-stanu-alternativnoi-energetiki-ta-rekomendatsii-po-ekologizatsii-palivno-e>
3. Ратушняк Г. С. Моделювання надійності систем тепlopостачання на основі лінгвістичної інформації / Г. С. Ратушняк, О. Левицький, О. Г. Ратушняк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2004. – №1. – С. 179-192.
4. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання: навч. посіб. / Г. С. Ратушняк, В. В. Дзеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця: ВНТУ, 2010
5. Теплові насоси. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://tth.com.ua/pub.php?id=15&lang=ukr>.
6. Низькопотенційна енергетика: навч. посіб. / А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко, О. Ф. Редько, Г. С. Ратушняк, М. Г. Хмельнюк. – Друкарня Мадрид, 2016. – 412 с.
7. Мальований М. С. Світовий досвід, переваги та недоліки застосування теплових насосів у теплоенергетиці України / М. С. Мальований, О. Ю. Берлінг // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3 – С. 89-94.
8. Адаменко О. М. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії / О. М. Адаменко, В. А. Височанський, В. М. Лютко. – Івано-Франківськ: ІМЕ, 2001. – 432с.
9. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли / Г. П. Васильев. – Москва: Издательский дом «Граница», 2006. – 176 с., ил. – С. 62 – 66.
10. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. – Москомархитектура. ГУП "НИИЦ", 2001.
11. Амерханов Р. А. Гетротермальная энергия в системах теплоснабжения / Р. А. Амерханов // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 2. – С.30-34.
12. Безродний М. К. Оптимальна робота теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунту / М. К. Безродний, Н. О. Пригула // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2012. – №1. – С. 7-12.
13. Ратушняк Г. С. Аналіз факторів оцінки надійності теплового насоса / Г. С. Ратушняк, Д. А. Шпіта // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – № 2(8). – С. 98-105.

References

1. *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh i netradytsiinykh dzherel enerhii Ukrainy*. NAN Ukrainy, Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky, Derzh. kom. Ukrainy z enerhozberezhennia, 2005.
2. *Analiz suchasnoho stanu alternatyvnoi enerhetyky ta rekomendatsii po ekolohizatsii palyvno-enerhetychnoho kompleksu Ukrainy*. <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnogo-stanu-alternativnoi-energetiki-ta-rekomendatsii-po-ekologizatsii-palivno-e>
3. Ratushniak H. S., Levytskyi O., Ratushniak O. H. "Modeliuvannya nadiinosti system teplopostachannia na osnovi linhvistychnoi informatsii." *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktii v budivnytstvi*. №1, 2004. pp. 179-192.
4. Ratushniak H. S., Dzhezhdzula V. V., Anokhina K. V. *Enerhozberihaiuchi vidnovliuvalni dzherela teplopostachannia*. VNTU, 2010
5. *Teplovi nasosy*. <http://tteh.com.ua/pub.php?id=15&lang=ukr>
6. Redko A. O., Bezrodnyi M. K., Zahoruchenko M. V., Redko O. F., Ratushniak H. S., Khmelniuk M. H. *Nyzkopotentsiina enerhetyka*. Drukarnia Madryd, 2016.
7. Malovanyi M. S., Berlih O. Yu. "Svitovyi dosvid, perevahy ta nedoliky zastosuvannia teplovykh nasosiv u teploenerhetytsi Ukrainy." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 2012. № 3. pp. 89-94.
8. Adamenko O. M., Vysochanskyi V. A., Lotko V. M. *Alternatyvni palyva ta inshi netradytsiini dzherela enerhii*. IME, 2001.
9. Vasylev H. P. *Teplokhladosnabzhenie zdaniy i sooruzheniy s ispolzovaniem nyzkopotentsyalnoi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli*. Hranitsa, 2006.
10. *Rukovodstvo po primeneniiu teplovykh nasosov s ispolzovaniem vtorichnykh energeticheskikh resursov i netradytsiynykh vozobnovliaemykh istochnikov energii*. Moskomarkhytektura. HUP "NYATs", 2001.
11. Amerkhanov R. A. "Hetrotermalnaia enerhiya v systemakh teplosnabzheniya." *Promyshlennaia teplotekhnika*. 2006. Vol. 28, № 2. pp. 30-34.
12. Bezrodnyi M. K., Prytula N. O. "Optymalna robota teplovoho nasosa v nyzkotemperaturnykh systemakh opalennia z vykorystanniam teploty gruntu." *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut"*. 2012. №1. pp. 7-12.
13. Ratushniak H. S., Shpita D. A. "Analiz faktoriv otsinky nadiinosti teplovoho nasosa." *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2018. № 2(8). pp. 98-105.

УДК 628.8

Моделирование надежности технического состояния тепловой насосной установки с использованием системы нечетких логических уравнений лингвистических переменных

Г. С. Ратушняк¹, О.Г. Лялюк², Д. А. Шпита³

¹к.т.н., профессор. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, ratusnag@gmail.com
ORCID 0000-0001-9656-5150

²к.т.н., доц. Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина, Lyalyuk74@gmail.com
ORCID 0000-0001-6446-9244,

³аспирант. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, shpitadima@gmail.com
ORCID 0000-0001-9811-6340

Аннотация. С целью создания экспертно-моделирующей системы для многофакторного анализа процесса накопления факторов, влияющих на техническое состояние теплового насоса, был использован математический аппарат, основанный на теории нечеткой логики и лингвистической переменной. Этот метод как взаимосвязанная совокупность математических моделей позволяет использовать экспертно-лингвистическую информацию для прогнозирования технического состояния теплового насоса в зависимости от обуславливающих факторов. Построены функции принадлежности нечетких оценок влияния факторов на прогнозируемое техническое состояние теплового насоса. Разработано дерево логического вывода иерархических связей факторов, которые могут влиять на оценку состояния теплового насоса. Выполнена оценка уровней лингвистических переменных, установлена связь между факторами, влияющими на техническое состояние тепловых насосов, используя систему терм-множества. Также построены нечеткие матрицы знаний с учётом введённых качественных термов и составлены лингвистические выражения, соответствующие системе нечетких логических уравнений, характеризующих поверхность принадлежности переменных по соответствующим термам.

Ключевые слова: моделирование, тепловые установки, прогнозируемое техническое состояние, лингвистическая переменная, факторы влияния.

UDC 628.8

Modeling the Reliability of the Technical State of a Thermal Pump Installation Using a System of Fuzzy Logical Equations of Linguistic Variables

H. S. Ratushniak¹, O. G. Lyalyuk², D. A. Shpita³

¹PhD, professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia Ukraine, ratusnag@gmail.com
ORCID 0000-0001-9656-5150

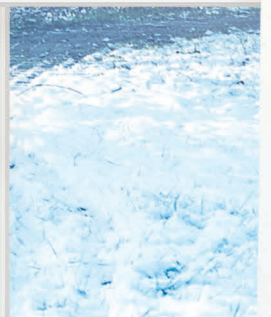
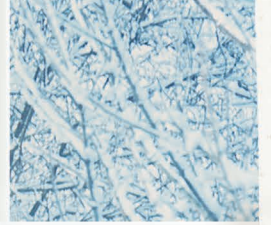
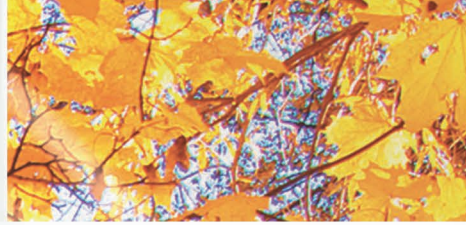
¹PhD., Associate Professor. Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, Lyalyuk74@gmail.com
ORCID 0000-0001-6446-9244

² postgraduate. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia Ukraine, shpitadima@gmail.com
ORCID 0000-0001-9811-6340

Abstract. Heat pumps are one of the effective ways for increasing the energy efficiency of heat supply. Prediction of the technical state of heat pumps is necessary for uninterruptible heat supply of the consumers. In order to create an expert-modelling system for multifactorial analysis of the process of accumulation of influencing factors for the technical state of a heat pump, a mathematical apparatus based on the theory of fuzzy logic and a linguistic variable was used. This method gives an interconnected set of mathematical models, which allows using expert-linguistic information to predict the technical condition of the heat pump, depending on the factors that determine it. The functions of membership of fuzzy estimations of the factors influence on the predicted technical condition of the heat pump are constructed. The tree of the logical conclusion of the hierarchical relations of factors that may influence the state of the heat pump is developed. An assessment was made of the levels of linguistic variables that establish the relationship between factors affecting the technical state of heat pumps using the term-set system. Fuzzy matrices of knowledge were also built on the basis of the introduced qualitative terms, and linguistic statements were made, which correspond to the system of fuzzy logic equations that characterize the surface of the variables belonging to the corresponding terms. The methodology of complex factors for the expert of the project on the assessment of the technical condition of the heat pump is presented, which enables to obtain the appropriate management decisions taking into account quantitative and qualitative excitatory factors that influence the reliability and durability of the operation of the heat pump. In the future, the field tests will be conducted, which allow confirmation of the fuzzy logic model of the heat pump state.

Keywords: modeling, heat pump units, predicted technical condition, linguistic variable, factors of influence.

Надійшла до редакції / Received 05.04.2019.



A white rectangular box containing the VENTS logo on the left and a QR code on the right. The logo features a stylized globe icon followed by the word "VENTS" in a bold, sans-serif font.

Комфортний мікроклімат будь-якої пори року...

ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНА УСТАНОВКА

ВЕНТС МІКРА 200 EPB WIFI

Нова кімнатна енергоощадна припливно-витяжна установка призначена для децентралізованої вентиляції громадських та комерційних приміщень, квартир і приватних будинків. Продуктивність становить до 200 куб. м/год.

Не потребує монтажу мережі повітропроводів і проведення будівельно-монтажних робіт, що виключає втручання в конструктивні елементи будівлі та зміну інтер'єру приміщення.



UDC 620.97:697.329

Ensuring Room Air Exchange for Exercises

P. Kapalo¹, O. T. Vozniak², Yu.S. Yurkevych³, Kh. V. Myroniuk⁴

¹PhD, associate professor, Technical University of Košice, Slovakia, peter.kapalo@tuke.sk ORCID: 0000-0001-9571-3887

²Sc.D, associate professor, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, orest.voznyak@i.ua ORCID:0000-0002-6431-088X

³PhD, associate professor, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, jurijjurkev@gmail.com ORCID:0000-0002-8869-7759

⁴PhD, associate professor, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, kristim81@ukr.net ORCID:0000-0002-6090-2298

Abstract. This paper presents the documentary part of the study of the effect of human physical activity on the microclimate of the premises. In gyms, ventilation requirements are higher than in conventional living quarters. Today, a lot of attention is paid to a healthy lifestyle. In cities where the environment is polluted with exhaust gases of vehicles, it is not recommended to go in for sports in urban parks. For this reason, a variety of simulators, including cycling, are used. When using simulators, indoor air quality deteriorates. The purpose of the study is to determine the amount of pollutants released in the room by means of experimental measurements and calculations, as well as determination of the required air exchange on the basis of the determined quantities. Such low quality of the internal environment can cause a decrease in human productivity, drowsiness, fatigue, and may also be the cause of various diseases. In this paper, an experimental measurement is documented, during which various motor activities of one person took place – sedentary administrative activity and exercise bike. Experimental measurements took place in two stages in winter. On the basis of the measured internal air parameters, the required airflow is calculated for both cases. Measured indoor air parameters (temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration) are documented in figure. Estimates can be used to select equipment for conditioning in gyms. On the basis of experimental measurements, we argue that the CO₂ concentration increases by 3.2 times in the case of a stationary exercise bike compared to sitting work. However, atmospheric air (m³ / year) – 5 times more.

Key words: rooms, motor activity, carbon dioxide, ventilation, flow rate.

Introduction. When designing ventilation in buildings, the designer is guided by standards and rules that provide, inter alia, the necessary air interchange indoors. One of these legislative acts in Slovakia is the Decree 210/2016 [1], which supplements and replaces Decree 259/2008 [2] on indoor requirements. In decree 210/2016 [1] for children and teens, the necessary microclimate parameters for training are also specified. It states that the temperature of the air must be at least 15 °C, the relative humidity of air from 30 to 70 %, and the frequency of air exchange of the room 5 h⁻¹. The average daily rate is often used in 24 hours. The quality of the exhaust air is considered satisfactory if, in its composition, it does not endanger the health or worsens the living conditions of people in or around the building. Circulation of ventilation air in a room should provide good ventilation of people's places of residence, reducing the concentration of pollutants to values below the maximum permissible concentrations [2].

This paper presents the documentary part of the study of the effect of human physical activity on the microclimate of the premises. For this purpose, experimental measurements were carried out indoors for various activities.

Problem. After replacing old windows with new dense windows due to lack of ventilation, room users may complain of increased fatigue, headaches, and the like. In the premises for gymnastics and other sports activities, it is necessary to

monitor the provision of proper air exchange.

Aim of the work. The purpose of the study is to determine the amount of pollutants released in the room by means of experimental measurements and calculations, as well as determination of the required air exchange on the basis of the determined quantities.

Method. In order to determine the necessary air indoors, we can use theoretical knowledge to calculate the amount of air from the concentration of carbon dioxide, which we can determine experimentally [3, 4]. Measurements were made in an area of 19 m² and an internal volume of 52 m³ (fig. 1). TESTO 435-4 + Testo 0632 multifunction sensor was used to measure indoor air temperature (temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration). Technical parameters of the measuring device: measuring range from 0 °C to + 50 °C, sensitivity of the instrument ± 0,1 °C and the accuracy of the device ± 0,3 °C. The relative humidity range is 0 to + 100 % RH, the sensitivity of the instrument ± 0,1 % RH, and the accuracy of the device ± 1,8% RH. The CO₂ concentration range is from 0 to 10,000 ppm, the instrument's sensitivity is 1 ppm, and the accuracy of the instrument is ± 3 %. The operating temperature of the measuring device is from – 20 °C to + 50 °C. The device is located near to the centre of the occupied area at an altitude of 0.8 to 1 m.

Experimental measurements took place in two stages in winter. At the first stage in the room there

was one person who worked on a stationary exercise bike [5].

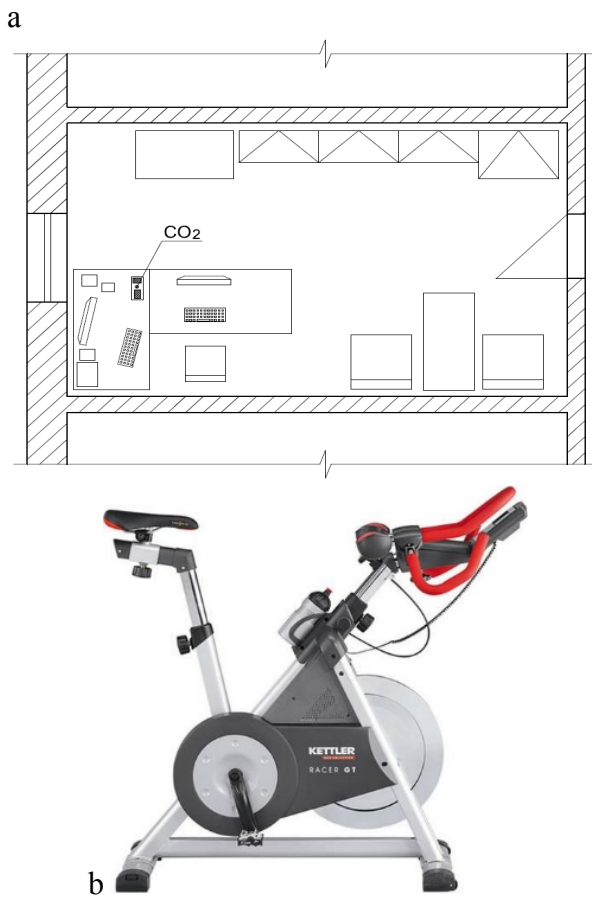


Fig. 1. Scheme of the experimental setup:
a – the experimental room; b – the exercise bike [5]

After the room was cleaned, a second stage of measurement was conducted, during which the same person was in a state of rest.

The amount of carbon dioxide was calculated according to the measurements of its concentration. Consequently, the necessary air exchange, which meets hygiene requirements, is calculated.

Results. Measured indoor air parameters (temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration) are documented in Fig. 2. From the measured indoor air temperature, it can be observed that the average air temperature is 22 °C. The average relative humidity was 33 %, which, according to Decree 210/2016 [1], is satisfactory. The concentration of carbon dioxide (CO₂) was 429 to 1 094 ppm, which is also permissible.

With the increase and decrease in CO₂ concentration, we can observe certain actions that are performed indoors.

As the CO₂ concentration, documented in Fig. 2, can be observed:

- from 9:54 to 10:54, the CO₂ concentration increased from 415 to 1 094 ppm. An increase in the concentration of CO₂ 11.32 ppm/min was caused

by work on the bike. At approximately 10:36, there is a slight interruption in the increase in CO₂ concentration due to acceleration of the bike from 17 km/h to 25 km/h.

- from 11:48 to 14:48, the CO₂ concentration increased from 425 to 1054 ppm. Change in the concentration of CO₂ at 3.49 ppm/min caused by changes in human physical activity.

Changing the concentration of CO₂ shows that when working on the simulator, the concentration of CO₂ changes 3.2 times faster than when sitting.

Based on the methodology for determining the volume flow of air on the basis of experimental measurements [6-9], a mass flow of CO₂ was expected. The calculation is made during a time interval of continuous increase of CO₂ concentration, during the stay of occupants in the room. The process is quantified below:

$$C_{IDA}(t) = q_m n V e^{-nt} + C_{SUP} + (C_{IDA(0)} - C_{SUP}) e^{-nt} \text{ [mg/m}^3\text{]}, \quad (1)$$

where q_m – CO₂ mass flow rate [mg/s]; n – ventilation rate from infiltration [s⁻¹]; V is room volume [m³]; C_{SUP} – outdoor air CO₂ concentration [mg/m³]; $C_{IDA(0)}$ – CO₂ concentration in the room at the beginning of its increase at $t=0$ [mg/m³]; $C_{IDA(t)}$ is CO₂ concentration [mg/m³] in the room after the time interval t [s] of continuous increase.

Then, a volumetric flow of fresh air was required to provide the required air quality. When the CO₂ mass flow rate q_m [mg/s] released by occupants is known, the total outdoor air volume flow rate needed to ensure a healthy indoor climate in the room is

$$q_v = q_m (C_{IDA} - C_{SUP}) \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2)$$

where C_{IDA} is indoor CO₂ concentration [mg/m³].

From the results presented in Table 1, it can be argued that while sitting, 33 m³/h of fresh air is required to provide the necessary air quality (the recommended maximum CO₂ concentration should be 1000 ppm), while training requires 30-40 % more.

Conclusion. On the basis of experimental measurements, we argue that the CO₂ concentration increases by 3.2 times in the case of a stationary exercise bike compared to sitting work. However, atmospheric air (m³/year) – 5 times more. These calculation values are considered only for one person who participated in experimental measurements.

Acknowledgement. This article was elaborated in the framework of the project VEGA

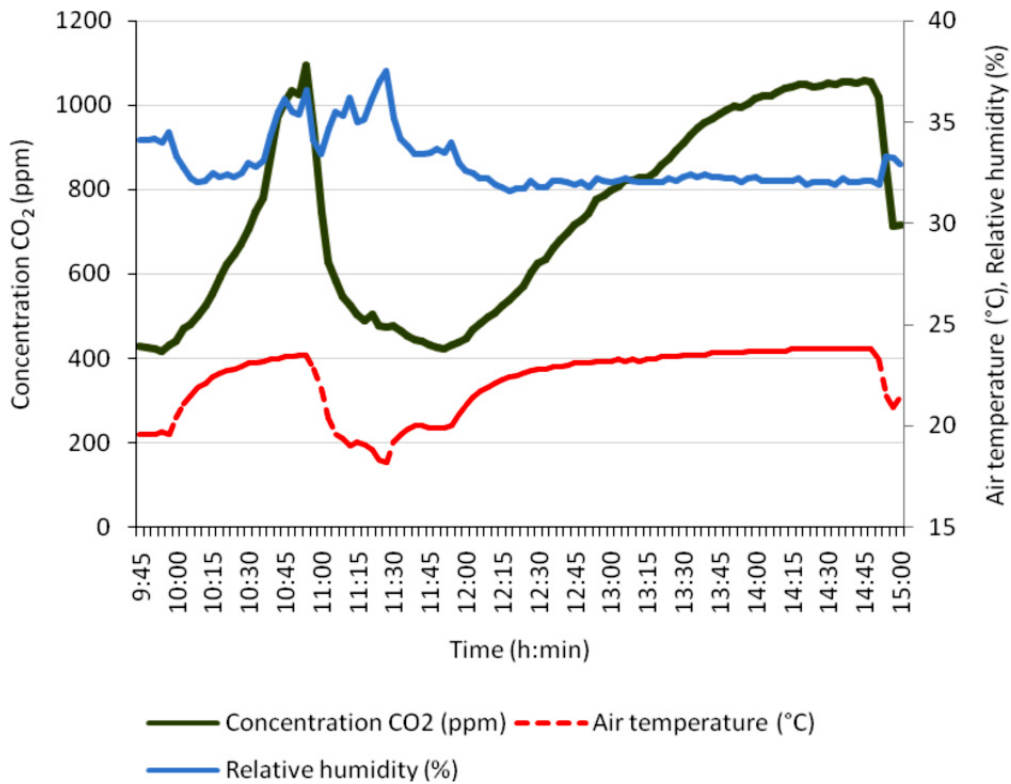


Fig. 2. Measurement of air indoors

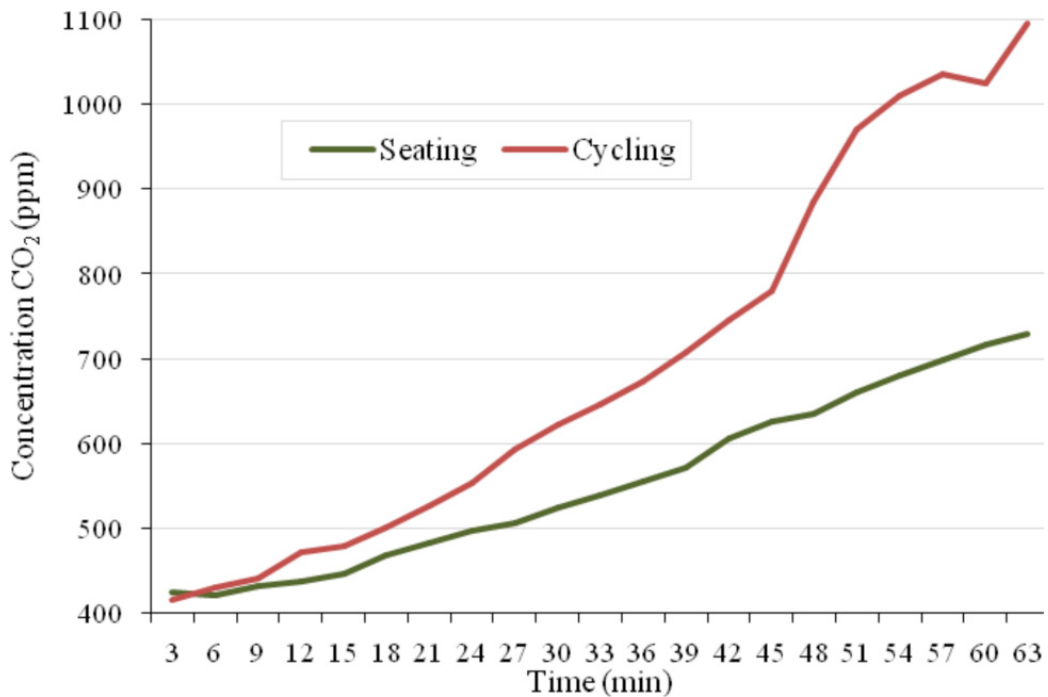


Fig. 3. Change in CO₂ concentration

Table 1

Physical activity of a person	Estimated air exchange		
	Speed [km/h]	Mass flow of CO ₂ [mg/s]	Air exchange [m ³ /h]
Work on a stationary exercise bike	17	12	43
	25	48	166
Seated administrative activity	0	9	33

References

1. Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky číslo 210/2016 Z. z. z 30. mája 2016, ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky číslo 259/2008 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia.
2. Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky číslo 259/2008 Z. z. z 18. júna 2008 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia.
3. Kapalo P. *Intenzita vetrania v budovách - teoretická a experimentálna analýza*. TU v Košiciach, Stavebná fakulta, Košice 2014. ISBN 978-80-553-1874-5
4. Kapalo P., Voznyak O., Yurkevych Y., Myroniuk K., Sukholova I. "Ensuring comfort microclimate in the classrooms under condition of the required air exchange." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5, Iss. 10, 2018, P. 6-14.
5. Kettler. Technické parametre cyklotrenažéra. Kettler Racer GT HKS Selection. Model 2008. Dostupné na: <https://www.cardiofitness.de/191c621/Kettler-Racer-GT-HKS-Selection.htm>
6. Kapalo P., Domnita F., Bacotiu C. and Podolák M. "The influence of occupants' body mass on carbon dioxide mass flow rate inside a university classroom - case study." *International Journal of Environmental Health Research*. 2018 . Vol. 28, no. 4. P. 432-447.
7. Kapalo P., Voznyak O. T. "Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode." *Czasopismo Inżynierii Ładowej, Środowiska i Architektury*, T. XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015). P.2 01 – 210.
8. Kapalo P., Vilcekova S., Voznyak O. "Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms." *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 39, 2014. P.1789 - 1794.
9. Kapalo P., Vilceková S., Domnita F., Voznyak O. "Determine a methodology for calculating the needed fresh air ." *The 9th International Conference "Environmental Engineering" 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania*. Selected papers. eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9 Section: Energy for Buildings.

УДК 620.97:697.329

Обеспечение воздухообмена помещения для гимнастики

П. Капало¹, О. Т. Возняк², Ю.С. Юркевич³, Х. В. Миронюк⁴

¹к.т.н., доц. Кошицкий Технический университет, Словакия, peter.kapalo@tuke.sk ORCID: 0000-0001-9571-3887

²д.т.н., доц. Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов, Украина, orest.voznyak@i.ua ORCID:0000-0002-6431-088X

³к.т.н., доц. Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов Украина, jurijjurkev@gmail.com ORCID:0000-0002-8869-7759

⁴к.т.н., доц. Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов Украина, kristim81@ukr.net ORCID:0000-0002-6090-2298

Аннотация. В спортивных залах требования к вентиляции выше, чем в обычных жилых помещениях. Сегодня большое внимание уделяется здоровому образу жизни. В городах, где окружающая среда загрязнена выхлопными газами транспортных средств, не рекомендуется заниматься спортом в городских парках. По этой причине используются различные тренажеры, в том числе велосипедные. При использовании тренажеров качество воздуха в помещении ухудшается. Целью исследования является определение количества загрязняющих веществ, выбрасываемых в помещение с помощью экспериментальных исследований и расчетов, а также определение необходимого воздухообмена на основе определенных количеств. Низкое качество внутренней среды может привести к снижению производительности человека, сонливости, усталости, а также может быть причиной различных заболеваний. В этой статье приведены результаты экспериментального исследования, в ходе которого имели место различные двигательные действия одного человека — сидячая административная деятельность и велосипедный тренажер. Зимой экспериментальные исследования проводились в два этапа. На основании измеренных параметров внутреннего воздуха требуемый поток воздуха рассчитывается для обоих случаев. Оценки могут быть использованы для выбора оборудования для кондиционирования воздуха спортивных залов. На основании экспериментальных измерений показано, что концентрация CO₂ увеличивается в 3,2 раза в случае стационарного велосипедного тренажера по сравнению с работой сидя. Однако при этом требуется - в 5 раз больше наружного воздуха.

Ключевые слова: комнаты, моторная активность, углекислый газ, вентиляция, скорость потока

UDC 620.97:697.329

Забезпечення повітрообміну приміщення для гімнастики

П. Капало¹, О. Т. Возняк², Ю.С. Юркевич³, Х. В. Миронюк⁴

¹к.т.н., доцент. Кошицький Технічний університет, Словачія, peter.kapalo@tuke.sk ORCID: 0000-0001-9571-3887

²д.т.н., доцент. Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна, orest.voznyak@i.ua
ORCID:0000-0002-6431-088X

³к.т.н., доцент. Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів Україна, jurijjurkev@gmail.com
ORCID:0000-0002-8869-7759

⁴к.т.н., доцент. Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів Україна, kristim81@ukr.net
ORCID:0000-0002-6090-2298

***Анотація.** У спортивних залах вимоги до вентиляції вищі, ніж у звичайних житлових приміщеннях. Сьогодні велика увага приділяється здоровому способу життя. У містах, де навколишнє середовище забруднене вихлопними газами транспортних засобів, не рекомендується займатися спортом в міських парках. З цієї причини використовуються різні тренажери, у тому числі велосипедні. При використанні тренажерів якість повітря в приміщенні погіршується. Особливо це стосується приміщень, у яких встановлено герметичні пластикові вікна і відсутня адекватна вентиляція. Низька якість внутрішнього середовища може привести до зниження продуктивності людини, сонливості, втоми, а також може бути причиною різних захворювань. Метою дослідження є визначення кількості забруднювальних речовин, що викидаються в приміщення, за допомогою експериментальних досліджень і розрахунків, а також визначення необхідного повітрообміну. Вимірювалися температура, відносна вологість повітря та концентрація вуглекислого газу в приміщенні. Основною умовою є не перевищення гранично допустимої концентрації вуглекислого газу – 10000 ppm. У цій статті наведені результати експериментального дослідження, в ході якого мали місце різні рухові дії однієї людини – адміністративна діяльність сидячи і вело-тренажер. Взимку експериментальні вимірювання проводилися у два етапи. На підставі вимірних параметрів внутрішнього повітря необхідна витрата повітря розраховується для обох випадків. Отримані результати можуть бути використані для вибору обладнання для кондиціонування повітря спортивних залів. На підставі експериментальних досліджень отримано, що концентрація CO₂ збільшується в 3,2 рази в разі стаціонарного вело-тренажера порівняно з роботою сидячи. При цьому вимагається у 5 разів більше зовнішнього повітря. Ці розрахункові значення отримані тільки для однієї людини, яка брала участь в експериментальних дослідженнях.*

Ключові слова: кімнати, моторна активність, вуглекислий газ, вентиляція, швидкість потоку

Надійшла до редакції / Received 08.04.2019.

УДК 622.807+622.235.3

Дослідження ефективності застосування водного розчину реагенту «Лексол» для пилоподавлення

В. Г. Наливайко¹, В. А. Коновалюк²¹к.т.н., доц. Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, vadim.moris@gmail.com²к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, viktorija.konovalyuk@gmail.com

Анотація. Проведене експериментальне дослідження ефективності використання водного розчину поверхнево-активної речовини «Лексол» для пилоподавлення при проведенні масових вибухів у кар'єрах, на технологічних автошляхах та використанні як антизмерзаючої речовини при транспортуванні сипучих вантажів. Поставлена задача вирішувалася за допомогою проведення промислових досліджень щодо визначення ефективності зниження пилоутворення при проведенні масових вибухів шляхом попереднього зволоження кар'єрних блоків водним розчином поверхнево активної речовини «Лексол». Цей антипиловий реагент є водним розчином гліцеринового компоненту рослинного походження, що призначений для закріплення ерозійно небезпечних поверхонь полімінерального складу. У кар'єрі ПрАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» були проведені експериментальні вибухи на горизонті мінус 360 м із застосуванням даного реагенту та промислові дослідження зв'язування пилу на кар'єрних автошляхах при їхньому поливі водним розчином поверхнево активної речовини «Лексол». Визначені оптимальні концентрації та кількості для нанесення реагенту «Лексол» на поверхню, що виділяє пил, та сипучий матеріал, при розпилюванні реагенту і поливі. Також досліджувалась ефективність застосування водного розчину поверхнево активної речовини «Лексол» як антизмерзаючої речовини при транспортуванні і складуванні руд. Визначено, що реагент економічно ефективний при використанні в зимовий період року. У ході досліджень було підтверджено процес зв'язування поверхнево-активною речовиною «Лексол» частинок пилу, що залишилися на поверхні кар'єрного блоку після бурових робіт, і які активно беруть участь у загальному процесі формування пилогазової хмари. При 5% концентрації водного розчину антипилового реагенту «Лексол» середня ефективність пилоподавлення становила 21%. Визначено, що ефективний час збереження в'язучих властивостей реагенту на поверхні автодорогі становить близько 10 днів. При повторному нанесенні водного розчину ПАР «Лексол» тривалість часу ефективного зв'язування пилу буде зростати.

Ключові слова: кар'єр; масовий вибух; автодорога; пилоподавлення.

Вступ. При проведенні масових вибухів у кар'єрах в атмосферу викидається значна кількість пилу і газів, більша, ніж при інших технологічних процесах гірничого виробництва. Пилогазова хмара, що утворюється під час вибуху, забруднює атмосферу не тільки кар'єрів та їхніх промислових майданчиків, а й територію прилеглих до них районів. За даними Науково-дослідного інституту безпеки праці та екології у гірничорудній та металургійній промисловості Криворізького національного університету при масових вибухах у кар'єрах утворюється від 0,027 до 0,170 кг пилу на 1 м³ гірничої маси.

Кар'єрні автодороги також є одним з основних джерел виділення пилу в атмосферу кар'єру і навколишнє середовище. Результати досліджень показують, що маса пилу, яка виділяється з поверхні автодорогі під час транспортування гірничої маси автосамоскидами в сухий теплий період року, може досягати кількох десятків тонн на місяць. Пил, що виділяється з кар'єрних автодоріг, забруднює повітря робочих зон кар'єрів і погіршує санітарно-гігієнічні умови праці гірників. Висока запиленість повітря ускладнює видимість на автошляхах, особливо в темний період доби, що створює

умови для аварійних ситуацій під час руху технологічного автотранспорту. Крім того, частина пилу виноситься з кар'єрного простору, що призводить до забруднення атмосферного повітря прилеглих територій.

Актуальність дослідження. Пилоподавлення при масових вибухах базується в основному на використанні методу зрошення блоків, що підриваються, до, під час і після проведення масових вибухів. Однак існуючі заходи щодо скорочення пилогазових викидів в атмосферу при проведенні масових вибухів до теперішнього часу не вирішили цю проблему. Крім того, реалізація більшості методів пов'язана з певними фінансовими витратами. Тому розробка нових способів зволоження блоків, що підриваються, розчинами сучасних реагентів, які виробляються в Україні, є необхідною і актуальною.

Пилоутворення на автодорогах відбувається внаслідок пиління гірничої маси, яка висипається з кузова автотранспорту, утворення пилу колесами автомашин і зносу матеріалу полотна автодороги. На інтенсивність пиловиділення на автодорогах впливають в основному фізико-механічні властивості матеріалу покриття, швидкість руху, маса і тип автотранспорту,

розміри дороги і метеорологічні умови.

Збільшення глибини кар'єрів, і як наслідок збільшення протяжності кар'єрних автодоріг, призводить до зростання пиловиділення з поверхні доріг. У зв'язку з цим рішення проблеми зниження пиловиділення на кар'єрних автошляхах є важливим і необхідним.

Останні дослідження та публікації. Основні способи боротьби з пилом при масових вибухах на даний час базуються на використанні методу попереднього зволоження блоків, що підриваються. Одним з найбільш відомих і широко застосовуваних способів боротьби з пилом при вибухах є водяні гідрозабійки різних видів [1, 2]. Типи гідрозабійок були розроблені Науково-дослідним інститутом безпеки праці та екології у гірничорудній та металургійній промисловості Криворізького національного університету і включають зовнішні, внутрішні і комбіновані гідрозабійки. У «Керівному документі по використанню зволоженої забійки зарядів при вибухових роботах на кар'єрах, по дегазації підірваної гірничої маси і очищення атмосфери від шкідливих продуктів вибуху» вказані технологічні рекомендації щодо застосування забійок та організації їхнього використання. А в «Типових заходах ...» [2] наведені значення ефективності заходів щодо пилогазоподавлення при масових вибухах.

Раніше проведеними дослідженнями для пилоподавлення на кар'єрних автодорогах найчастіше рекомендувалися такі засоби як вода, лігносульфонати і відходи нафтопереробної промисловості [3, 4]. Недоліком води і лігносульфонатів є те, що в суху спекотну погоду вони відносно швидко висихають. Це сприяє подальшому інтенсивному пиловиділенню при русі автотранспорту. Відходи нафтопереробної промисловості на даний час знаходять своє застосування як вторинна енергетична сировина.

У роботі [5] проводилися дослідження щодо використання для боротьби з пилом на кар'єрних автодорогах лужного стоку виробництва капролактаму, речовини «Северин», яка є відходом, утвореним у результаті переробки нафти; суміші «Северина» з добавкою синтетичного каучуку СКС-30 і вуглелужного реагенту. Але реалізація більшості розглянутих методів пов'язана зі значними фінансовими витратами.

Формулювання цілей статті. Задачею дослідження є визначення ефективності використання водного розчину поверхнево активної речовини «Лексол» для зниження пиловиділення при проведенні масових вибухів і

для зв'язування пилу на автодорогах кар'єрів. Поставлена задача вирішувалася за допомогою проведення промислових досліджень щодо визначення ефективності зниження пилоутворення шляхом попереднього зволоження блоків, що підриваються, водним розчином ПАР «Лексол», а також зв'язування пилу на кар'єрних автошляхах при їхньому поливі водним розчином пропонованого реагенту.

Основна частина. Ефективними речовинами для пилоподавлення на кар'єрних автодорогах слід вважати ті, які мають низьку інтенсивність випаровування і здатність до безперервного зв'язування пилу. Однак, навіть найбільш високоефективна пилов'язувальна речовина не може забезпечити запобігання пиловиділення з автодороги протягом тривалого часу, якщо ця дорога побудована з відхиленнями від відповідних правил. Це пояснюється тим, що розчин буде утворювати тонку плівку, яка буде руйнуватися під колесами автосамоскидів. Як наслідок, ефективність будь-якого розчину для пилоподавлення буде залежати від якості дорожнього покриття. Тому будівництво доріг необхідно проводити відповідно до чинних нормативних документів та інструкцій щодо будівництва кар'єрних автодоріг.

При виборі пилов'язувального реагенту для ефективного пилоподавлення при проведенні масових вибухів і зниження пиловиділення на кар'єрних автодорогах необхідно також враховувати його конкурентну вартість і умови виробництва обраного реагенту в Україні.

Антипиловий реагент «Лексол-5» є водним розчином гліцеринового компоненту рослинного походження, що призначений для закріплення ерозійно-небезпечних поверхонь полімінерального складу, які пилять на хвостосховищах, на відвалах гірських порід, при транспортуванні залізної руди в залізничних вагонах. Реагент використовується для захисту докільця в залізорудній, вугільній, будівельній промисловості та енергетиці. Він сприяє боротьбі з пилом завдяки зв'язувальним і гігроскопічним властивостям. Цей реагент придатний для змочування будь-якого сипучого матеріалу або поверхні, здатної утворювати пил при перемішуванні, транспортуванні, обробці та вітрової ерозії.

З метою боротьби з пилом «Лексол», зазвичай, розбавляють пом'якшеною водою, що містить приблизно від 5 % до 80 % маси реагенту.

Для нанесення реагенту «Лексол» на поверхню, що виділяє пил, витрата становить

240...1200 г реагенту на 1 м² поверхні залежно від способу нанесення, стану атмосфери, наявності й частоти опадів та температури навколишнього середовища. Оптимально в літній період при слабких опадах використовувати 3 % склад реагенту, а в дощову погоду і в морози – 5 % склад. При розпилюванні реагенту на поверхню витрата становить 240...300 г/м², при використанні поливального обладнання витрата може зростати до 500...1200 г/м².

На реагент «Лексол» отримано Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи № 05.03.02-07/29643 від 30.04.2014 року [6], та ТУ У 20.5-39086735-001:2014 [7].

У кар'єрі ПрАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» у вересні 2017 р. були проведені експериментальні вибухи із застосуванням антипилового реагенту «Лексол». Вибухи проводилися на горизонті мінус 360 м.

Досліджувані блоки, що підривалися, ділилися за довжиною на дві однакові ділянки. На першій ділянці блока на поверхню наносився водний розчин поверхнево активної речовини «Лексол-5» з витратою 2,0 – 2,5 дм³/м² досліджуваної поверхні шляхом його розпилення за допомогою поливальної машини з гідромонітором. На другій ділянці засоби пилоподавлення не використовувались. Для доставлення і нанесення поверхнево активної речовини «Лексол» на поверхню ділянки блока застосовано поливальну установку на базі автомобіля БелАЗ із цистерною місткістю 30 м³, обладнану насосом та гідромонітором.

Вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі після масового вибуху з використанням зазначеного розчину проводилося лабораторією промислової екології Науково-дослідного інституту безпеки праці та екології у гірничорудній та металургійній промисловості Криворізького національного університету за відповідною методикою [8].

При проведенні масових вибухів на досліджуваних блоках проводилася зйомка розвитку пилогазової хмари. Аналіз отриманих світлин показав, що над обробленою водним розчином поверхнево-активної речовини «Лексол» ділянкою блока розвиток пилогазової хмари менш виражений, ніж над необробленою (рис. 1).

Ефективність застосування антипилового реагенту «Лексол» при нанесенні його на поверхню блока, що підривається, підтверджується також протоколами промислових досліджень.

На підставі проведених досліджень визначено ефективність заходу із застосуванням

водного розчину реагенту «Лексол-5». У середньому вона становила 21 % за пилом. За газоподібними забруднювальними речовинами ефективність не спостерігалася.

Одночасно з проведенням промислових досліджень щодо визначення ефективності зниження запиленості на блоках, які підривалися, проводилося зволоження кар'єрних доріг водним розчином поверхнево-активного реагенту "Лексол-5" (рис. 2). Зрошення поверхні автодоріг проводилося 3 % водним розчином поверхнево активної речовини «Лексол» з витратою 0,4...0,5 л/м² за допомогою поливальної машини на базі автомобіля БелАЗ.

Для отримання порівняльних характеристик ефективності зв'язування пилу на поверхнях кар'єрних автодоріг заміри запиленості повітря проводилися на двох однакових експериментальних ділянках автодороги: I – на ділянці без нанесення реагенту, II – на ділянці з нанесеною поверхнево-активною речовиною «Лексол». Розміри ділянок обиралися рівнозначними з довжиною ділянки 500 м. Заміри пиловиділення з поверхні дороги проводилися методом відбору проб забрудненого повітря в одних і тих же умовах за методикою [9].

Ділянка автодороги для вимірювань приймалася завдовжки близько 10 м. Це середня відстань, яку проїжджає автосамоскид за одну секунду при середній швидкості між навантаженим (30 км/год) і порожнім (40 км/год) станами.

На зволожених ділянках дороги відразу після поливу ефективність пилоподавлення 3 % водним розчином реагенту «Лексол» становила 85 %, на третій день після поливу – 45...50 %, через 2 тижні – 10%.

При складуванні й транспортуванні руд та інших сипучих матеріалів у осінньо-зимовий період при зниженні температури нижче 0 °С відбувається змерзання рудної сировини і примерзання її до поверхні залізничних вагонів. Це ускладнює проведення вантажно-розвантажувальних робіт. Виникає необхідність розморожування руди в тепляках. Тому досліджувалася ефективність застосування водного розчину поверхнево активної речовини «Лексол» як антизмерзаючої речовини при транспортуванні сипучих вантажів.

У зимовий час на гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького рудного басейну використовують антизмерзаючу речовину – хлорид магнію (MgCl₂) «бішофіт», застосування якої має складний технологічний регламент нанесення та високу вартість.



Рис. 1. Формування пило-газової хмари після вибуху досліджуваного блоку №166 в період 08.09.2017р.



Рис. 2. Процес зрошення технологічного автошляху в кар'єрі

Реагент «Лексол» економічно ефективний при від'ємній температурі. Він дозволяє уникнути використання «теплеків» при розвантаженні вагонів і мінімізувати час простою рухомого складу. Найбільшу ефективність для обробки вантажів, які змерзаються, дає водний 30 % розчин реагенту «Лексол». Його робочий режим становить до мінус 30 °С. При цьому витрата розчину становить 0,15...0,3 дм³ на 1 м² оброблюваної поверхні.

Висновки. В ході проведених досліджень підтверджено процес зв'язування поверхнево-активною речовиною «Лексол» дрібнодисперсних часток пилу, що залишилися на поверхні блоку, що підривається, після бурових робіт, і які активно беруть участь у загальному процесі формування пилогазової хмари. При 3 % концентрації водного розчину антипилового реагенту "Лексол-5" середня ефективність пилоподавлення становила 21 %.

Дослідження також показали можливість попереднього зволоження блоку за два дні до моменту вибуху. Випаровування застосовуваного реагенту на зволоженому блоці в теплий період року не відбувається внаслідок великої гігроскопічності пилових часток, які утворюють захисну плівку з реагенту "Лексол-5".

При зволоженні кар'єрних автодоріг 3 % водним розчином ПАР «Лексол» визначено ефективність запропонованого способу зв'язування пилу на поверхні доріг, яка становить від 85 % до 45 %, що дозволяє

рекомендувати його застосування в промислових умовах.

Промислові дослідження підтвердили нешкідливість реагенту «Лексол». Під час нанесення водного розчину реагенту і в наступні дні не виявлено запаху або інших негативних впливів.

У ході проведення досліджень визначено ефективний час збереження в'язучих властивостей реагенту на поверхні автодоріг, який становить близько 10 днів. При повторному нанесенні тривалість часу ефективного зв'язування пилу буде зростати.

Застосування реагенту «Лексол» економічно доцільно у зв'язку з його конкурентною ціною і виробництвом в Україні.

Перспективи подальших досліджень.

Характеристики антипилового реагенту «Лексол-5» згідно з технічним паспортом дозволяють його ефективне застосування в холодний період року до негативних температур (мінус 7,5) °С, а 30 % водного розчину реагенту «Лексол-30» – до мінус 30 °С. Для визначення ефективності пилоподавлення при обробці поверхні блоку перед підривом і кар'єрних автодоріг водним розчином поверхнево-активної речовини «Лексол» у холодний період року необхідне проведення промислових досліджень для конкретних умов. Для визначення ефективності антизмерзаючого ефекту потрібне проведення досліджень властивостей реагенту "ЛЕКСОЛ" у промислових умовах в зимовий період часу.

Література

1. Керівний документ по використанню зволоженої забійки зарядів ВР при вибухових роботах на кар'єрах, по дегазації підірваної гірничої маси і очищенню атмосфери від шкідливих продуктів вибуху. – Кривий Ріг – 1997р. – КТУ НДІБТГ. – с. 9.
2. Типові заходи по зменшенню викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря при використанні масових вибухів на кар'єрі ПАТ «ІнГОК». – Кривий Ріг. – 2015. – 3 с.
3. Просандєєв М. І. Основні шляхи адаптації технологій відкритих гірничих робіт до вимог сталого розвитку суспільства / М. І. Просандєєв, Л. М. Козлова // Екологія і природокористування: збірник наук. праць / Інститут проблем природокористування та екології. – 2011. – Випуск №14. – с.143 - 160.
4. Кошкаров В. Е. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. «Технология обеспыливания карьерных автодорог на основе битумно-полимерных материалов.» – ФГБУ ВПО «УрГУПС». – Екатеринбург. – 2014 г. – 150 с.
5. Тыщук В. Ю. Разработка и исследование средств пылеподавления на карьерных автодорогах на основе микрокапсулированных растворов. – «НИИБТГ» ГВУЗ «Криворожский национальный университет». – Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. – 2013 г. – с. 225-228.
6. Заключение государственной санитарно-эпидемиологической экспертизы № 05.03.02-04/35332 от 27.05.2014 г. на реагент антипыльный «Лексол» (ТУ У 20.5-39086735-001:2014): «Лексол-5», «Лексол-10».
7. Заключение государственной санитарно-эпидемиологической экспертизы № 05.03.02-07/29643 от 30.04.2014 г. на ТУ У 20.5-39086735-001:2014.
8. Методические указания по определению и расчету неорганизованных выбросов пыли и ядовитых газов массовыми взрывами и экскаваторными забоями в карьерах. – Кривой Рог, ВНИИБТГ, 1985. – 27 с.

9. Инструкция по обеспыливанию автомобильных дорог на открытых горных разработках предприятий черной металлургии. – Москва, ВНИИБТГ МИНЧЕРМЕТ СССР, 1988. – 28 с.

References

1. *Kerivnyi dokument po vykorystanniu zvolozhenoi zabiiky zariadiv VR pry vybukhovykh robotakh na karierakh, po de hazatsii pidirvanoj hirnychoj masy i ochyshchenniu atmosfery vid shkidlyvykh produktiv vybukhu.* Kryvyi Rih – 1997r. – KTU.NDIBTH. – s.9.
2. *Typovi zakhody po zmeshenniu vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria pry vykorystanni masovykh vybukhiv na karieri PAT «InHOK».* – Kryvyi Rih. – 2015r. –3 s.
3. *Prosandiev M. I., Kozlova L. M. "Osnovni shliakhy adaptatsii tekhnologii vidkrytykh hirnychykh robit do vymoh staloho rozvytku suspilstva."* *Ekolohiia i pryrodokorystuvannia.* 2011r. Vol. 14. pp.143 – 160.
4. *Koshkarov V. E. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni k.t.n. «Tehnologiya obespylivaniya ka-rernykh avtodorog na osnove bitumno – polimernykh materialov.* FGBU VPO «UrGUPS». 2014.
5. *Tyischuk V. Yu. Razrabotka i issledovanie sredstv pyilepodavleniya na karernykh avtodorogah na osnove mikroapsulirovannykh rastvorov.* «NIIBTG» GVUZ «Krivorozhskiy natsionalnyy universitet». Visnik Krivorizkogo natsionalnogo universitetu. 2013.
6. *Zaklyuchenie gosudarstvennoy sanitarno-epidemiologicheskoy ekspertizy № 05.03.02-04/35332 ot 27.05.2014 g. na reagent antypyliny «Leksol» (TU U 20.5-39086735-001:2014): «Leksol-5», «Leksol-10».*
7. *Zaklyuchenie gosudarstvennoy sanitarno-epidemiologicheskoy ekspertizy № 05.03.02-07/29643 ot 30.04.2014 g. na TU U 20.5-39086735-001:2014.*
8. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu i raschetu neorganizovannykh vyibrosov pyili i yadovykh gazov massovyimi vzryvami i ekskavatornyimi zaboyami v karerakh.* VNIIBTG, 1985.
9. *Instruktsiya po obespylivaniyu avtomobilnykh dorog na otkrytykh gornykh razrabotkakh predpriyatiy chernoy metallurgii.* VNIIBTG MINChERMET SSSR, 1988.

УДК 622.807+622.235.3

Исследование эффективности использования водного раствора реагента “Лексол” для снижения пылевыделения

В. Г. Наливайко¹, В. А. Коновалюк²

¹к.т.н., доц. Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, vadim.moris@gmail.com

²к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, viktorija.konovalyuk@gmail.com

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование эффективности использования водного раствора поверхностно-активного вещества «Лексол» для пылеподавления при проведении массовых взрывов в карьерах, на технологических автостоянках и использовании в качестве антисмерзающего вещества при транспортировке сыпучих грузов. Поставленная задача решалась посредством проведения промышленных исследований по определению эффективности снижения пылеобразования при проведении массовых взрывов путём предварительного увлажнения карьерных блоков водным раствором поверхностно активного вещества «Лексол». Антипылевой реагент представляет собой водный раствор глицеринового компонента растительного происхождения, предназначенный для закрепления эрозионноопасных поверхностей полиминерального состава. В карьере ЧАО «Инулецкий горно-обогатительный комбинат» были проведены экспериментальные взрывы на горизонте минус 360 м с применением данного реагента и промышленные исследования связывания пыли на карьерных автостоянках при их поливе водным раствором поверхностно активного вещества «Лексол». Определены оптимальные концентрации и количества для нанесения реагента «Лексол» на поверхность пыли и сыпучего материала, при распылении реагента и поливе. Также исследовалась эффективность применения водного раствора поверхностно активного вещества «Лексол» в качестве антисмерзающего вещества при транспортировке и складировании руд. Определено, что реагент экономически эффективен при использовании в зимний период года. В ходе исследований был подтверждён процесс связывания поверхностно-активным веществом «Лексол» частиц пыли, оставшихся на поверхности карьерного блока после буровых работ, и активно участвующих в общем процессе формирования пылегазового облака. При 5 % концентрации водного раствора антипылевого реагента «Лексол» средняя эффективность пылеподавления составила 21 %. Определено, что эффективное время сохранения вязких свойств реагента на поверхности автостоянок составляет около 10 дней и при повторном нанесении водного раствора поверхностно активного вещества «Лексол» продолжительность времени эффективного связывания пыли будет расти..

Ключевые слова: карьер; массовый взрыв; автостоянка; пылеподавление.

UDC 622.807+622.235.3

Investigation of the Efficiency of the Application of Water Solution of Lexol Reagent for Preparation of Pulling

V. Nalyvaiko¹, V. Konovaliuk²

¹PhD, associate professor. Kryvy Rih National University, Kryvy Rih, Ukraine, vitdengub@gmail.com

²PhD, associate professor. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.
viktorija.konovalyuk@gmail.com

Abstract. A study of the effectiveness using the aqueous solution of the surfactant "Lexol" for dust suppression during mass explosions in quarries, on technological highways and use as an anti-freezing agent during transportation of bulk cargoes. The task was solved by conducting industrial studies to determine the effectiveness of reducing dust formation during mass explosions by pre-moistening the quarry blocks with the aqueous solution of surfactant "Lexol". Anti-dust reagent is an aqueous solution of glycerin component of plant origin, intended for fixing of erosion-hazardous surfaces of poly-mineral composition. Experimental explosions on the horizon of minus 360 m with the use of this reagent were carried out in the PJSC "Ingulets mining and processing integrated plant" quarry and industrial researches of dust binding on quarry roads with their watering by the aqueous solution of "Lexol". The optimal concentrations and amounts for application of the Lexol reagent to the surface of the dust and loose material during spraying of the reagent and watering have been determined. Also, the effectiveness of using the aqueous solution of surfactant "Lexol" as an anti-freezing agent during transportation of bulk cargoes was investigated. It is determined that the reagent is economically efficient when used in the winter period of the year. In the research, the process of binding the dust particles by the surfactant "Lexol" remaining on the surface of the quarry block after drilling operations was confirmed, and which are actively involved in the overall process of forming a dust-gas cloud. At 5 % concentration of aqueous solution of the reagent "Lexol-5", the average effectiveness of dust suppression was 21 %. It is determined that the effective time of preserving the properties of the reagent on the road surface is about 10 days, and when repeated application of the aqueous solution of the surfactant "Lexol", the time of effective dust binding will increase.

Key words: quarry; mass explosion; highway; dust suppression.

Надійшла до редакції / Received 21.05.2019.

Наукове видання

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 29

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/node/78>).

Підписано до друку 25.06.2019. Формат 60×84 1/8
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 6,25, обл. вид. арк. 6,75.
Наклад 300 прим. Замовлення № 305.

Надруковано в ПП "Март"
м. Київ, вул. Є. Сверстюка, 19.



ПРИПЛИВ ЗНАНЬ З ПРИПЛИВОМ ПОВІТРЯ!

Підлогові децентралізовані припливно-витяжні установки **ДВУТ**

- Установки ДВУТ призначені для вентиляції шкіл, офісів та інших соціальних і комерційних приміщень
- Ідеально підходять для організації простої та ефективної вентиляції в готових та реконструйованих приміщеннях і не вимагають монтажу мережі повітропроводів



Провітрюють
приміщення



Очищують
повітря



Заощаджують
електроенергію



Працюють
тихо





СВІТОВИЙ ЛІДЕР

серед вентиляційних рішень

www.vents.ua

