

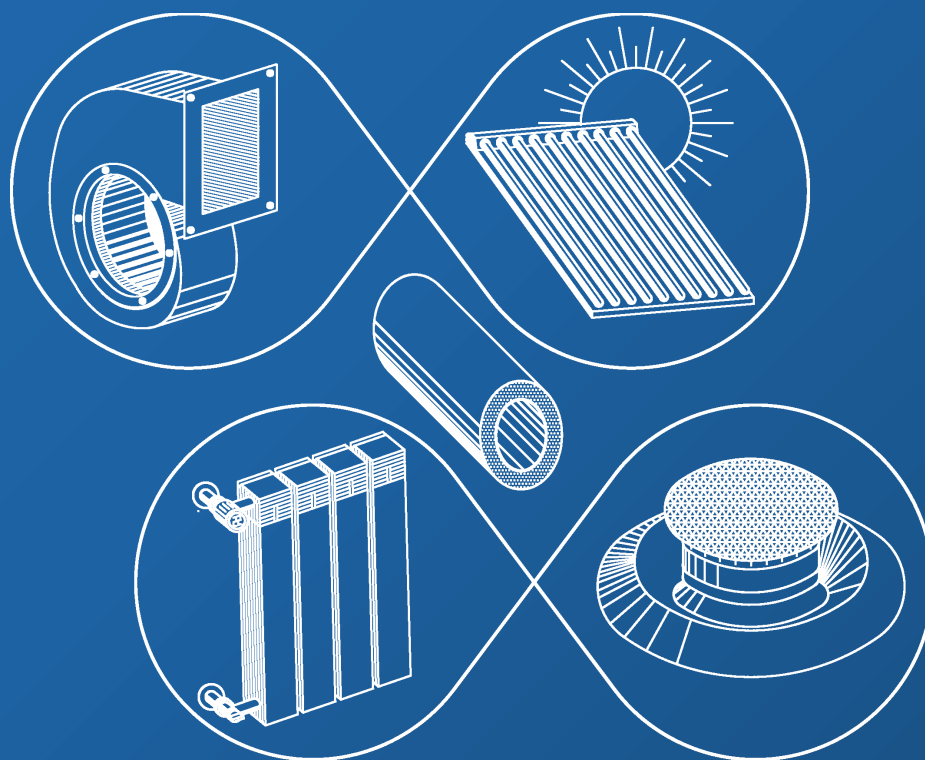


ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2025

Випуск 52



КИЇВ 2025

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 52

Kyiv 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 52

Київ 2025

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 52 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2025. – 97 с.

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

Редакційна колегія: докт. техн. наук, професор В. О. Мілейковський (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); ас. О.А. Дудніков (відповідальний секретар); докт. екон. наук, доцент К. М. Предун; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професорка Т. М. Ткаченко; докт. техн. наук, професор Г. В. Жук; докт. техн. наук, професор В. А. Кравець; докт. техн. наук, професор Г. Гавардашвілі (Грузія); докт. техн. наук, професор З. Гвішані (Грузія); докт. техн. наук, професор Н. Мамедов (Азербайджан); докт. техн. наук, професор Б. Рашуо (Сербія); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); докт. техн. наук, професор М. Улевіч (Польща); доктор інженер, доцент А. Ліс (Польща); доктор інженер, доцент А. Уйма (Польща); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 30 травня 2025 р., протокол № 33.

Адреса редакційної колегії: Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теплогазопостачання і вентиляції та кафедра теплотехніки, Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, 03037, Україна.
тел. +380(44)245-48-33

© Київський національний
університет будівництва і
архітектури

З М І С Т

Володимир Ісаєв, Євген Патрашку, Ірина Ковальова

*МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ЗНИЖЕННЯ
КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДОНУ В ПРИМІЩЕННІ.....* 6

Юрій Франчук, Вікторія Коновалюк

*ОРГАНІЗАЦІЯ РОБІТ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОВОГО ГОСПОДАРСТВА.....* 20

**Олександра Череднікова, Дмитро Гузик, Віктор Мілейковський,
Артем Харченко, Артем Соснін, Микола Чередніков**

*ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ
КОРПУСУ Ф НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ “ПОЛТАВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА”.....* 32

**Олександр Редько, Андрій Редько, Ігор Редько, Максим Батюта, Олег
Ліщинський, Кирил Цимбал**

*МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ БІОМАСИ ШЛЯХОМ
ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ.....* 47

Олександр Любарець, Максим Микитенко,

*ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ДИСКОВОГО
РОЗПИЛЮВАЧА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПИЛОВЛОВЛЕННЯ В УМОВАХ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОТОКІВ.....* 69

Георгій Ратушняк, Андрій Лялюк,

*ЕКСПЕРТНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ НЕЧІТКИМИ
МНОЖИНАМИ ТА ЛІНГВІСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ.....* 85

CONTENTS

Volodymyr Isaev, Evgen Patrashku, Iryna Kovaleva

*MATHEMATICAL ANALYSIS AND MODELLING of
REDUCING RADON RADIATION ACTIVITY IN THE BUILDING*6

Yurii Franchuk, Viktoriia Konovaliuk

*ORGANIZATION OF HIGH-HAZARDOUS WORK AT GAS UTILITY
ENTERPRISES*.....20

**Oleksandra Cherednikova, Dmitro Huzyk, Viktor Mileikovskiy, Artem
Kharchenko, Artem Sosnin, Mykola Cherednikov**

*THERMAL MODERNIZATION AND IMPROVEMENT OF ENGINEERING
SYSTEMS OF CAMPUS F OF NATIONAL UNIVERSITY "YURI
KONDRATYUK POLTAVA POLYTECHNIC"*.....32

**Oleksandr Redko, Andriy Redko, Ihor Redko, Maksym Batyuta, Oleg
Lishchynskyy, Kyryl Tsymbal**

*A METHOD FOR ESTIMATION OF BIOMASS ENERGY UTILISATION BY
BIOGAS PRODUCTION*.....47

Oleksandr Liubarets, Maksym Mykytenko

*STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN OF THE DISC SPRAYER ON
THE EFFICIENCY OF DUST COLLECTION IN HIGH-TEMPERATURE
FLOWS*.....69

Heorhiy Ratushnyak, Andriy Lyalyuk

*EXPERT ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF ENCLOSURES OF
BUILDING STRUCTURES BY FUZZY SETS AND LINGUISTIC VARIABLES*.....85

УДК 69.699.887.3

доцент **Володимир Ісаєв**,
isaevv5@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9947-7284,
аспірант **Євген Патрашку**,
patrashku07@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4802-2889,
доцентка **Ірина Ковальова**,
kovaleva1102@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0918-1376,
Одеська державна академія будівництва та архітектури

МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДОНУ В ПРИМІЩЕННІ

Анотація: Отримано аналітичні залежності щодо визначення концентрації Радону ^{222}Rn у повітрі приміщень різного призначення, де має місце просочування газу через нещільності або тріщини в огорожувальних конструкціях (бомбосховища, підвальні, напівпідвальні нежитлові та житлові приміщення першого-третього поверхів будівель і споруд). На основі отриманих формул став можливим розрахунок зміни концентрації газу в досліджуваному просторі.

Розроблена математична модель, що використовує чисельне моделювання ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics) підтвердила результати розрахунку за отриманими аналітичними залежностями. На основі рівнянь нерозривності та усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса "RANS" (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) отримано результати щодо зміни стану повітряного середовища у вентильованому просторі: графік зміни концентрації ^{222}Rn спочатку забрудненого приміщення (500 Бк/м^3) до нормативної величини в часі при надходженні інертного газу до приміщення і роботі системи загальнообмінної вентиляції; масової частки ^{222}Rn у часі по досягненню величини допустимої нормативними документами України; ліній течії ^{222}Rn (Velocity Stream Line). Отримано інженерні формули для розрахунку зниження концентрації ^{222}Rn при роботі системи загальнообмінної вентиляції. Рекомендована схема повітрообміну в приміщеннях з надходженням ^{222}Rn через нещільності або тріщини в підлозі - "подача припливного повітря зверху - видалення витяжного повітря знизу".

Ключові слова: концентрація (^{222}Rn), радіоактивний розпад, радіоактивне забруднення приміщень, припливно-витяжна вентиляція.

Вступ. Радон – це радіоактивний інертний газ без запаху, кольору та смаку. Для забезпечення радонової безпеки необхідні вдосконалені методи розрахунку радіоактивності повітряного середовища [1], що можуть бути створені на основі фізико-математичних моделей процесів виділення радону та його проникнення

в приміщення. Радон небезпечний радіоактивними продуктами свого розпаду. Він утворюється кількома шляхами. Один із найпоширеніших – у процесі природного радіоактивного розпаду урану, що присутній у гірських породах і ґрунтах. Радон єдиний із благородних газів, що не має стабільних і довго живучих ізотопів. Він розчиняється в крові, воді та інших рідинах організму, значно краще розчиняється в жирах, що зумовлює ефективне поглинання його жировими тканинами при надходженні в організм [2]. Радон може проникати в організм навіть через неушкоджену шкіру [3]. Продукти розпаду радону високотоксичні: це короткоживучі ізотопи полонію, вісмуту й свинцю. Саме вони згубно впливають на організм людини.

Радон надходить у підвальні і далі житлові приміщення крізь огорожувальні конструкції з розломів у земній корі, від уранових виробок, шахт, штолень. В Україні найбільша потенційна небезпека від радону існує в межах Українського кристалічного щита, особливо на стиках із сусідніми тектонічними плитами і платформами (рис. 1). Ще один шлях проникнення радону в приміщення – надходження з атмосферним повітрям.

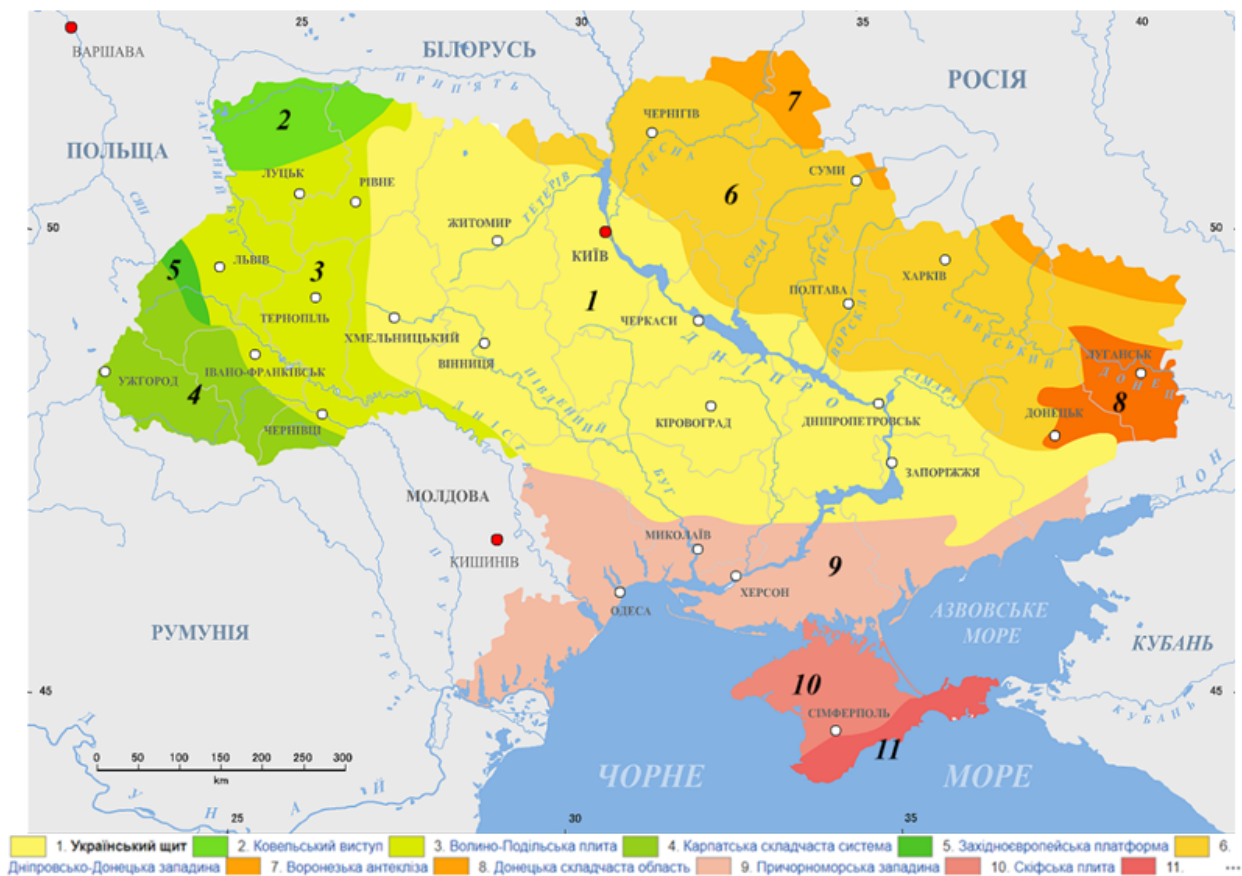


Рис. 1 Тектонічна карта України

Згідно зі звітом ВООЗ, до 14 % усіх захворювань на рак легенів у світі пов'язані з впливом на людину саме цього інертного газу. За концентрації радону в 100 Бк/м^3 у приміщенні, ризик отримати онкологію легенів збільшується до 16 %. [4, 5].

Останні дослідження та публікації. Є численні дослідження поширення радону:

- у питній воді [6, 7];
- природному газі [8];
- ґрунтовому повітрі [9];
- атмосферному повітрі [10];
- у повітрі приміщень житлових і громадських будівель [8, 11].

Поштовхом до вищезазначених досліджень послугували дані, отримані у Швеції в середині минулого століття, щодо високого вмісту радону в житлових будівлях, які не пов'язані з виробничою діяльністю уранових шахт [12].

У зарубіжних країнах рівень радону в повітрі вимірюється в одиницях активності радону (ОА), у пострадянських країнах (Азербайджан, Білорусь, Киргизія, Молдова, Таджикистан, Україна) використовуються показники середньорічної еквівалентної одиниці активності (ЕРОА) ізотопів радону (^{222}Rn , ^{220}Rn) [1].

За оцінками, середній рівень об'ємної активності (ОА) радону в повітрі приміщень у світі становить близько 40 Бк/м^3 , проте в країнах із високим природним радіаційним фоном (Швейцарія, Сербія) цей рівень може в кілька разів перевищувати середньосвітовий [4]. Наприклад, у школах і дитячих садках 20 країн рівень ОА радону варіюється від 17 Бк/м^3 (Саудівська Аравія) до 317 Бк/м^3 (Словаччина) [13]. У період з 2010 по 2020 рік рівень ОА радону в приміщеннях початкових класів різних країн варіювався від 27 до 480 Бк/м^3 , середнє арифметичне значення становило $133,43 \pm 95,14 \text{ Бк/м}^3$, а середнє геометричне – $109,06 \pm 1,87 \text{ Бк/м}^3$ [9].

На території України (Дніпропетровська, Кіровоградська, Житомирська, Вінницька та Черкаська області) відомі аномалії, які в десятки і сотні разів перевищують нормативи для радону в будівлях, будівельних матеріалах і воді. Моніторинг радону в різних областях України виявив, що ці факти не є одиничними. Результати обстеження понад 24 тис. будівель різних типів дали змогу встановити, що в 19 % будівель концентрації радону перевищують 100 Бк/м^3 , а в 0,3 % будівель було зафіксовано концентрації, що перевищують 200 Бк/м^3 . В окремих випадках були зафіксовані концентрації, що перевищують 500 Бк/м^3 [14].

На Українському щиті (див. рис. 1) розташовані Житомирська, Вінницька, Кіровоградська та Запорізька області, східні частини Рівненської та

Хмельницької області, північно-східні частини Одеської, Київської (правобережжя) та Черкаської областей, північні частини Миколаївської, Дніпропетровської (правобережжя) та Черкаської областей. Тому в будівлях цих областей часто спостерігається перевищення нормативів за радоном. Оцінка доз опромінення населення України свідчить про значні варіації радону в приміщеннях будівель [14, 15].

Створення комфортного, безпечного мікроклімату в приміщенні є першочерговим завданням у районах із підвищеною концентрацією ^{222}Rn .

Мета і завдання дослідження. Метою є розроблення методики розрахунку для досягнення:

- зниження радіаційної активності ^{222}Rn у робочій зоні приміщення;
- пропозиція схеми повітрообміну, що виключає можливість надходження радіоактивних ізотопів у зону дихання людини.

Завданням дослідження є створення математичної моделі та інженерного методу прогнозування оцінки зміни концентрації ^{222}Rn у приміщенні.

Основна частина.

Вихідні умови:

- ізольована площа дослідження (рис.2), площею 6 м^2 ;
- параметри повітря в ізольованому просторі:
 - температура повітря: $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - початковий рівень концентрації ^{222}Rn : 500 Бк/м^3 ;
 - надходження забрудненого повітря з рівнем концентрації ^{222}Rn : 500 Бк/м^3 ;
 - атмосферний тиск: $P_0 = 101325 \text{ Па}$;
- параметри аналізованого повітрообміну:
 - надходження чистого повітря у верхній точці з витратою $120 \text{ м}^3/\text{год}$ з концентрацією ^{222}Rn : 0 Бк/м^3 ;
 - видалення забрудненого повітря в нижній точці з витратою $120 \text{ м}^3/\text{год}$ за умов витісняючої вентиляції;

Моделювання надходжень шкідливих речовин до ізольованого простору представлено у схемі дослідження на рис.2. Із застосуванням обчислювального гідродинамічного комплексу моделювання ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідрогазодинаміка), створено математичну модель, яка імітує надходження ^{222}Rn крізь щілинний зазор конструкції підлоги з системою повітрообміну, що працює, в площині дослідження. Моделювання надходжень ^{222}Rn здійснено в нестационарних умовах з урахуванням роботи вентиляції. Схема організації повітрообміну стандартна для видалення важких газів: подавання повітря з верхньої зони струминами вертикально вниз, видалення з нижньої зони.

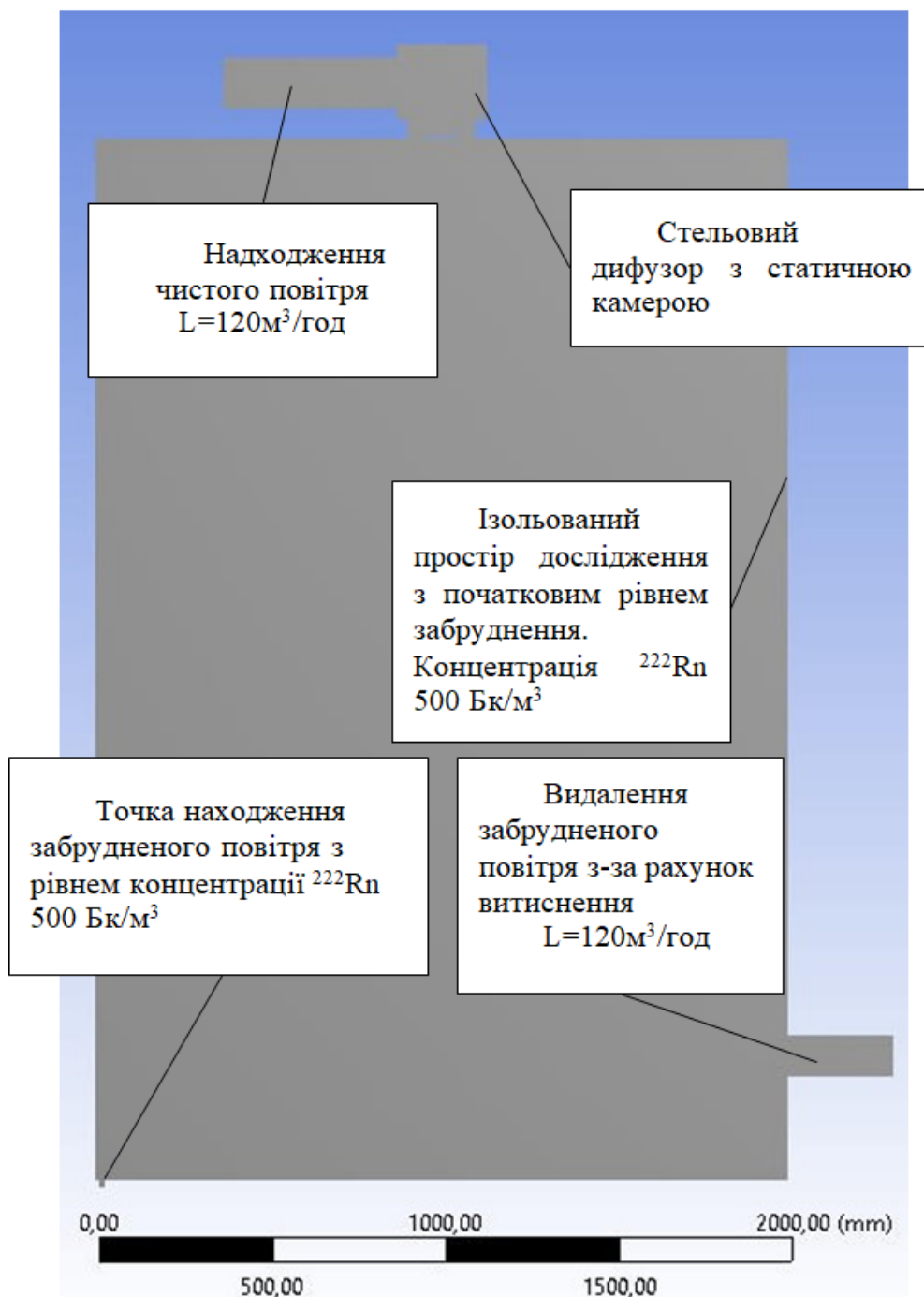


Рис. 2. Схема моделювання надходжень ^{222}Rn та повітрообміну

Насамперед, в ізолюваному просторі (рис. 3) визначено зміну концентрації ^{222}Rn в часі спостереження, при одночасному надходженні концентрації ^{222}Rn 500 Бк/м^3 (масова концентрація $\text{MF}(^{222}\text{Rn})=1.05\cdot 10^{-16}$) у нижній області крізь щілинний зазор конструкції підлоги, а також передбаченій вентиляції.

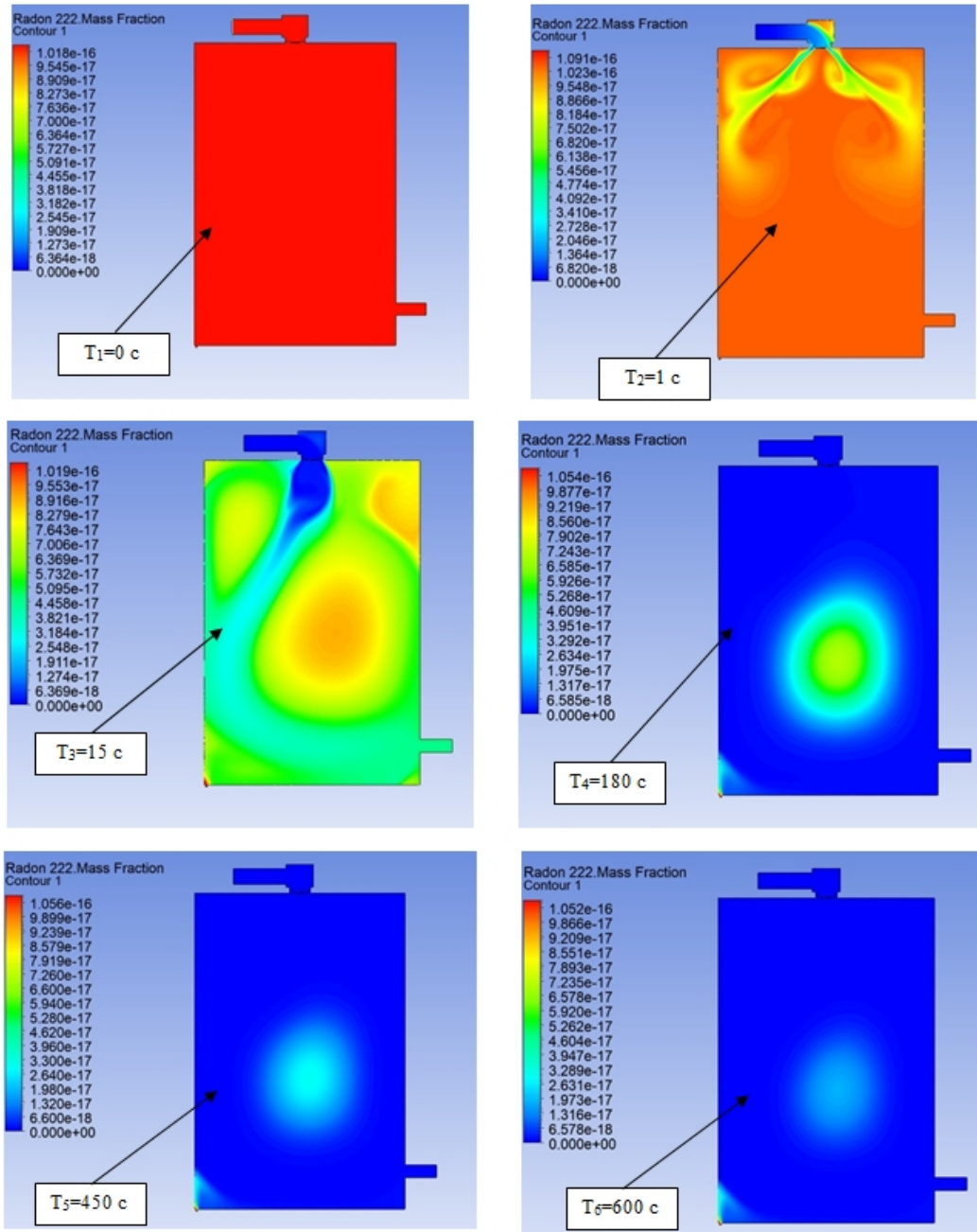


Рис. 3 Моделювання надходжень радону

Графік зміни масової концентрації (Mass fraction) і рівня радіації (Бк/м³) за часом подано на рис. 4. і рис. 5. для точки в робочій зоні на відстані 1,0-1,2 м від рівня підлоги. Для розрахунку концентрації радону $C(t)$ в приміщенні залежно від часу t , використовуємо рівняння балансу маси для радону:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C}{V} + \frac{S}{V} - \lambda \cdot C, \quad (1)$$

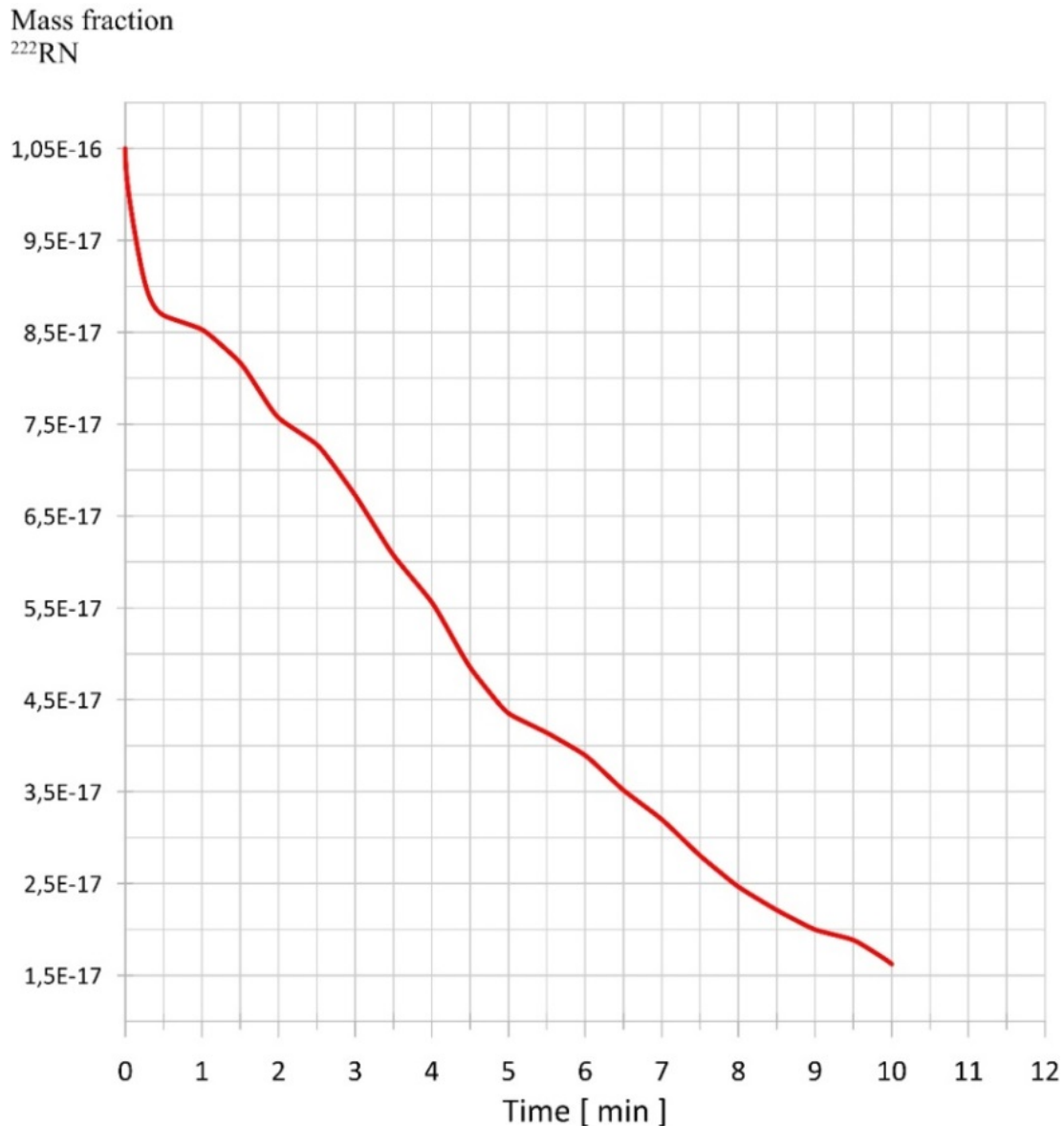


Рис.4 Графік зміни масової концентрації ^{222}Rn за часом

де, згідно з вихідними даними, $C(t)$ – концентрація радону ^{222}Rn у приміщенні (Бк/м³); t – час, год; Q_{in} – приплив повітря, м³/год, у даній роботі $Q_{in}=120$ м³/год; Q_{out} – видалення повітря, м³/год, $Q_{out}=120$ м³/год; C_{in} – концентрація радону ^{222}Rn у припливному повітрі (Бк/м³), у даній роботі $C_{in}=0$ Бк/м³; V – об’єм приміщення, м³, $V=12$ м³; S – швидкість виділення ^{222}Rn у приміщенні (Бк/год), $S=500$ Бк/м³год; $\lambda = \ln(2)/T_{1/2} = 0,007561$ – стала радіоактивного розпаду год⁻¹, $T_{1/2} = 91,68$ год – період напіврозпаду радону. Якщо підставити чисельні значення в (1), отримаємо:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -10,00756 \cdot C(t) + 41,67 \quad (2)$$

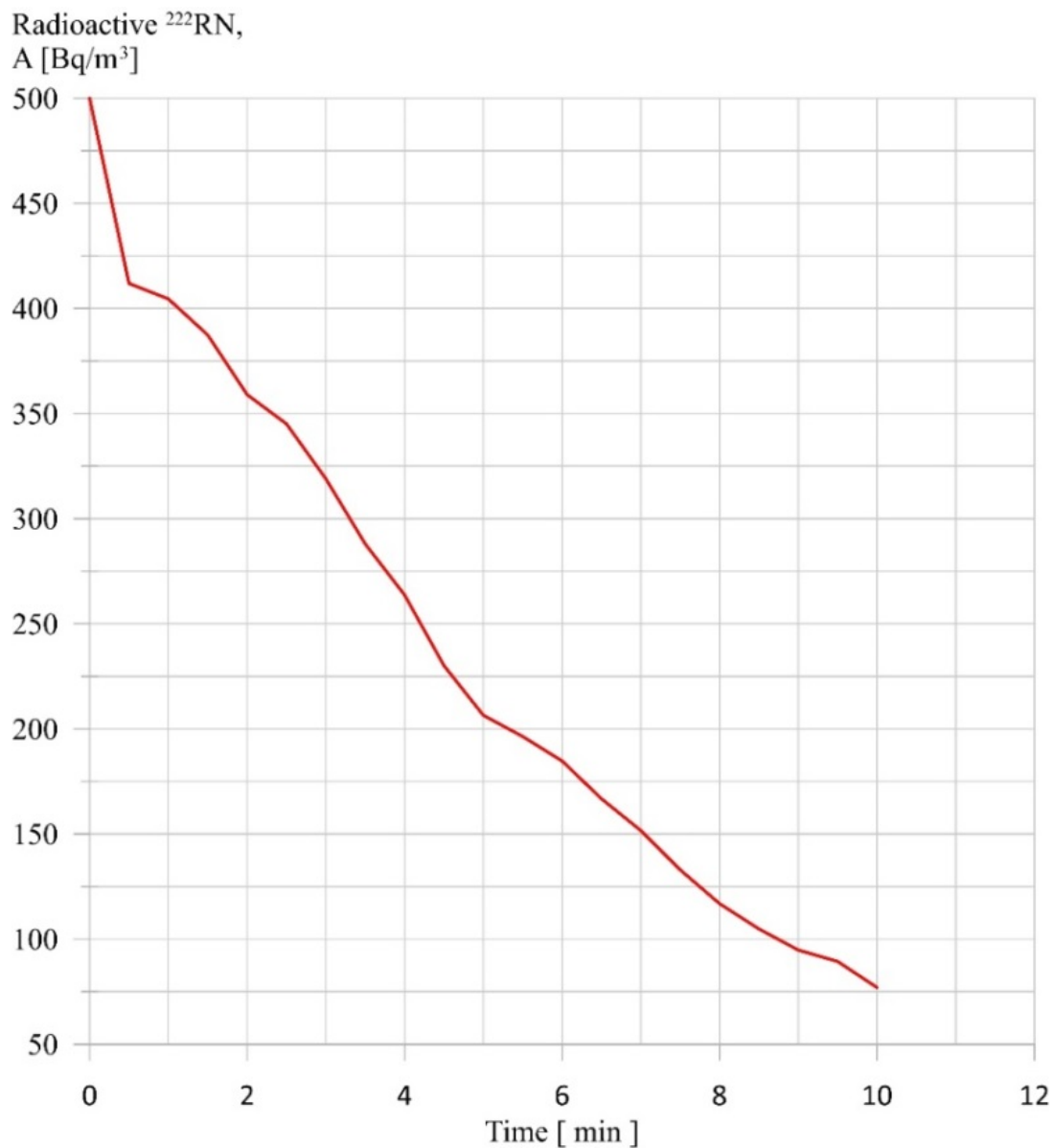


Рис. 5 Графік зміни рівня радіоактивності ^{222}Rn за часом

Рівняння (2) – це лінійне диференціальне рівняння першого порядку. Його розв'язок має вигляд:

$$C(t) = C_{\text{вст}} + (C_0 - C_{\text{вст}}) \cdot e^{-k \cdot t}, \quad (3)$$

де $C_{\text{вст}} = S/(Q + \lambda \cdot V) = 4,163 \text{ Бк/м}^3$ – концентрація радону, що встановилася;
 C_0 – початкова концентрація радону, Бк/м^3 ; $k = (Q/V) + \lambda = 10,00756 \text{ год}^{-1}$ – коефіцієнт.

Порівняльний аналіз концентрації при застосуванні програмного

комплексу ANSYS FLUENT та розв'язку диференціального рівняння балансу маси, який представлено графічно на рис. 6, вказує, що розрахунки набувають майже ідентичних значень.

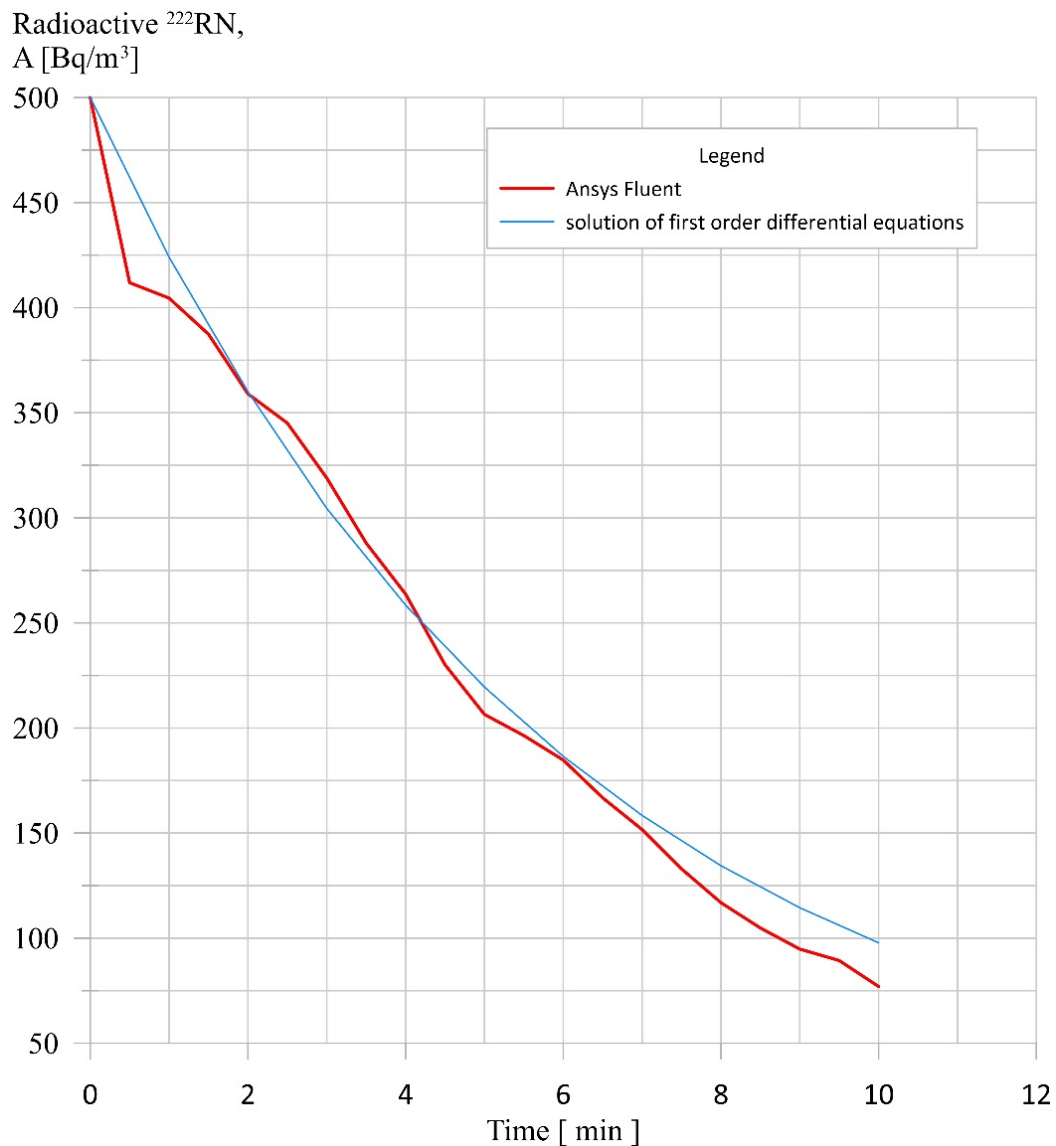


Рис. 6 Результати розрахунків радіоактивності:
червоний – моделювання; блакитний – за рівнянням (3)

Лінії течії при надходженні ^{222}Rn та функціонуванні системи вентиляції набувають вигляду (в площині дослідження X-Y) на рис. 7. Під час розгляду зміни концентрації ^{222}Rn доцільно також розглядати рух повітряного потоку Air Mass Fraction, як домінувального потоку, що залучає до своєї сфери впливу більш дрібні течії (рис.8). Аналіз рис. 3, 7 і 8 однозначно показує доцільність запропонованої схеми організації повітрообміну для приміщень, у які проникає ^{222}Rn . Адже усунуто можливість підняття радону в зону дихання людини.

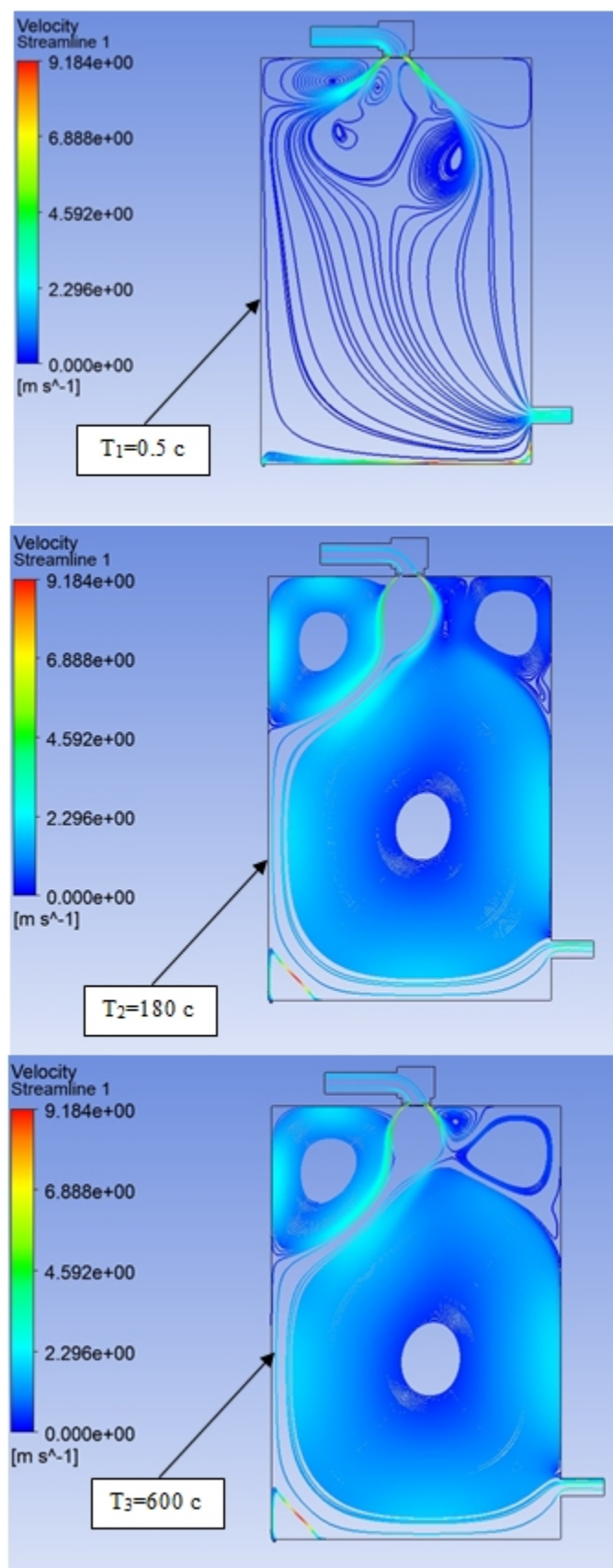


Рис. 7 Формування лінії току

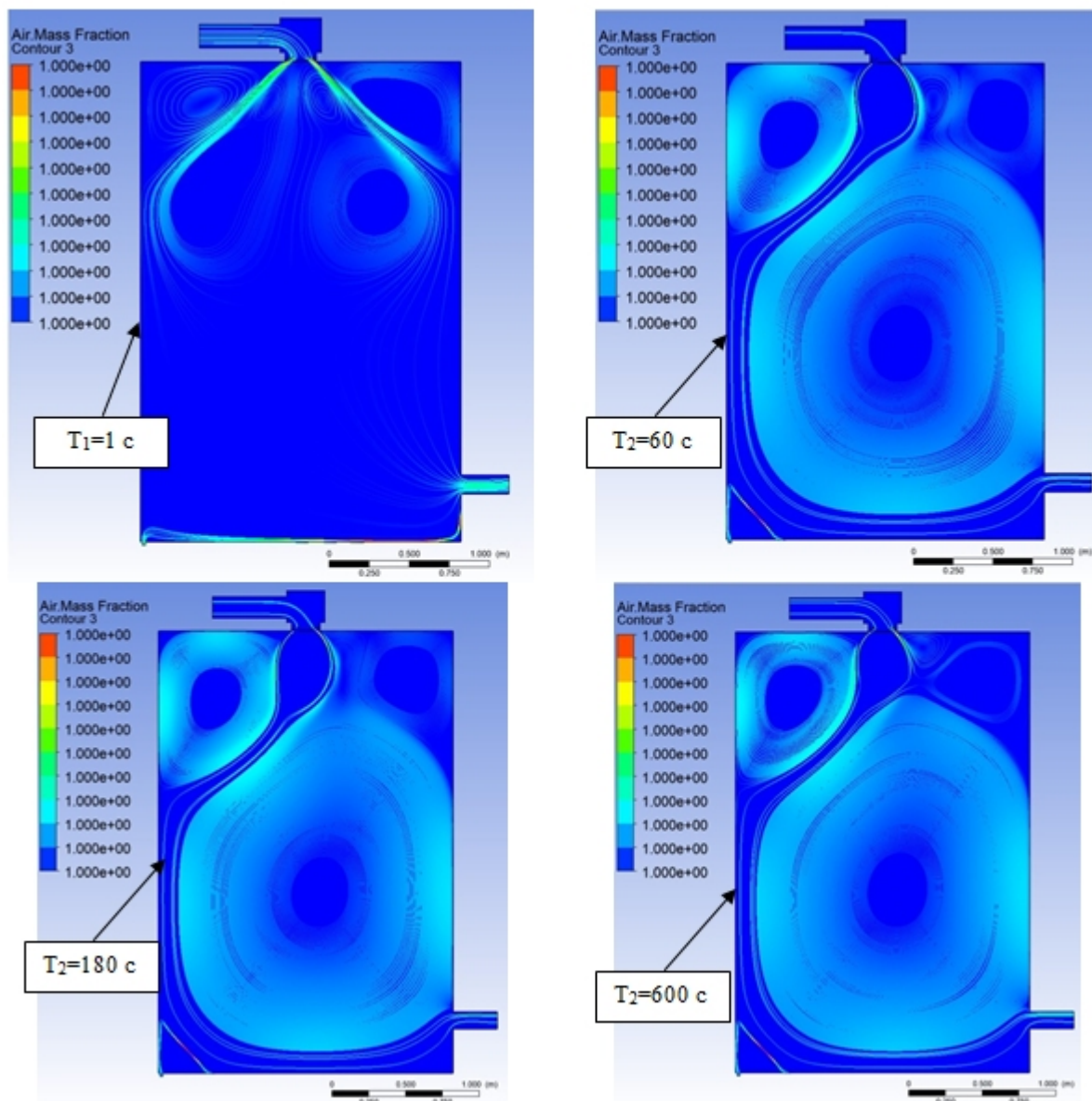


Рис. 8 Моделювання Air Mass Fraction

Висновки. Запропоновано інженерну залежність для розрахунку зміни концентрації ^{222}Rn , що дає добру збіжність результатів з математичною моделлю. Це дає змогу прогнозувати можливість зниження радіоактивного забруднення приміщень, забезпечених вентиляцією.

Збіжність результатів, отриманих розрахунковим шляхом і при використанні математичного моделювання, дає змогу рекомендувати запроповану залежність для практичних розрахунків (див. рис. 6).

Схема повітрообміну "подача припливного повітря зверху - видалення витяжного повітря знизу" усуває можливість контакту легень людини з

радіоактивним газом, і тому рекомендована до впровадження.

References:

1. Pro zakhyst liudyny vid vplyvu ionizuiuchoho vyprominiuvannia. Zakon Ukrainy vid 17.09.2023 №15/98-VR. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#>.
2. Darby S., Hill D., Doll R. Radon : a likely carcinogen at all exposures // Annals of Oncology Journal. 2001. Vol. 12. No. 10. P. 27.
3. Recalling radon's recognition. Brett F. Thornton and Shawn C. Burdette. NATURE CHEMISTRY VOL 5 SEPTEMBER 2013 www.nature.com/naturechemistry.
4. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva : WHO Press, 2009. 110 p. ISBN 978-92-4-154767-3.
5. Ionizing radiation: sources and biological effects. UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes. New York : United Nations, 1982. 773 p. ISBN 92-1-142200-0.
6. Komov I.L., Frolov O.S., Didenko P.I. et al. Methods and Facilities for the Assessment of the Radon-Hazard Potential. Kyiv: Logos. 2004. 416 p.
7. Management of radioactivity in drinking-water. Geneva : WHO Press, 2018. 104 p. ISBN 978-92-4-151374-6.
8. Antignani S., Venoso G., Ampollini M. et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates. Science of The Total Environment. 2021. 762. P.144150. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720376816>.
9. Kaur, M., Kumar, A., Mehra, R., Mishra, R. (2018). Study of radon/thoron exhalation rate, soil-gas radon concentration, and assessment of indoor radon/thoron concentration in Siwalik Himalayas of Jammu & Kashmir. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 24(8). 22752287. doi: 10.1080/10807039.2018.1443793.
10. Celikovic, I., Pantelic, G., Vukanac. I. et al. (2022). Outdoor radon as a tool to estimate radon priority areas - a literature overview. International Journal of Environmental Research and Public Health. 19(2). 662. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/2/662>.
11. Sa, J. P. et al. (2022). Radon in indoor air: towards continuous monitoring. Sustainability. 14(3). 1529. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1529>.
12. Su C., Pan M., Zhang Y. [et al.]. Indoor exposure levels of radon in dwellings, schools, and offices in China from 2000 to 2020: A systematic review.

Indoor Air. 2022. 32(1).P. 12920. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12920>.

13. Kojo, K., Kurtio, P. (2020). Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools -Enforcement of the Radiation Act. International Journal of Environmental Research and Public Health. 17(8). P.2877. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/8/2877>.

14. Komov, I.L., Frolov, O.S., Didenko, P.I. et al. (2005), The main problems of radon safety. Kyiv: Logos – 2005. – 351 c.

15. Pavlenko T., Los I. Exposure doses due to indoor radon-222 in Ukraine and basic directions for the desize // Radiation measurement. – 1997. – V. 28, N 1–6. – P. 733–73.

УДК 69.699.887.3

Associate Professor **Volodymyr Isaev**,
isaevv5@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9947-7284,
Postgraduate student **Evgen Patrashku**,
patrashku07@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4802-2889,
Associate Professor **Iryna Kovaleva**,
kovaleva1102@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0918-1376,
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

MATHEMATICAL ANALYSIS AND MODELLING OF REDUCING RADON RADIATION ACTIVITY IN THE BUILDING

Abstract: *Analytical dependencies for determining the concentration of Radon 222 (^{222}Rn) in the air of premises for various purposes where gas leaks through leaks or cracks in the building envelope (bomb shelters, basements, semi-basement non-residential and residential premises of the first to third floors of buildings and structures) were obtained. Based on the obtained formulas, it became possible to calculate the change in gas concentration in the investigated space.*

The developed mathematical model, which uses ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, confirmed the results of the calculation according to the analytical dependencies. Based on the continuity equations and the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (RANS), the results of changes in the state of the air environment in a ventilated space were obtained:

- graph of changes in ^{222}Rn concentration in the initially contaminated room (500 Bq/m^3) to the standard value over time when inert gas is supplied to the room and the general exchange ventilation system is in operation;*
- concentration by Mass Fraction for ^{222}Rn in time upon reaching the value*

permitted by the regulatory documents of Ukraine;

- ^{222}Rn current lines (Velocity Stream Line).

The engineering formulas for calculating the reduction of ^{222}Rn concentration during the operation of the general exchange ventilation system were obtained. The recommended scheme of air exchange in rooms with ^{222}Rn inflow through leaks or cracks in the floor is "supply air from above - exhaust air from below".

Keywords: *concentration (^{222}Rn), radioactive decay, radioactive contamination of premises, supply and exhaust ventilation.*

УДК 669.2

доцент **Юрій Франчук**,

franchuk196405@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7910-8705

Національний університет біоресурсів і природокористування

доцентка **Вікторія Коновалюк**,

konovaliuk.va@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5115-7188

Київський національний університет будівництва і архітектури

ОРГАНІЗАЦІЯ РОБІТ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОВОГО ГОСПОДАРСТВА

Анотація. Надійність систем газопостачання України знижується внаслідок зношення значної частини газопроводів та обладнання, руйнувань через обстріли газотранспортної та газорозподільчих мереж та обладнання на них. Нормативні документи визначали порядок експлуатації системи газопостачання у стандартних і складних інженерно-геологічних умовах, при повному заповненні штатного розпису підприємств. Проте не описаний порядок експлуатації в умовах активних бойових дій, що ведуться в зоні роботи мережі. У зв'язку зі збільшенням об'єму робіт і одночасно зменшенням кількості працівників різко збільшується питоме навантаження на працівників газових господарств. Працівники вимушені вирішувати робочі питання, які раніше виконувалися суміжними службами. Наразі недостатньо нормативних документів які регламентували би роботи щодо обслуговування й ремонту газових мереж в умовах пошкоджень і руйнувань, які відбуваються на території України. У роботі пропонується ряд заходів з організації безпечного виконання робіт підвищеної небезпеки на підприємствах експлуатації газового господарства. Необхідно на час воєнних дій переглянути вимоги до кваліфікаційного рівня виконавців робіт при одночасному забезпеченні посиленого контролю з боку керівників газонебезпечних робіт та досвідчених членів бригади. Проводити позачергові навчання працівників правилам безпечного ведення газонебезпечних і аварійних робіт в умовах воєнних дій. Розробити програми навчання виконання робіт підвищеної небезпеки для фахівців, які мають освіту у суміжних сферах.

Ключові слова: робота підвищеної небезпеки, газонебезпечні роботи, наряд-допуск, охорона праці, газопостачання.

Вступ. Відповідно до Конституції України, людина, її життя, здоров'я та безпека є найвищою соціальною цінністю, кожний працівник має право на належні, безпечні й здорові умови праці. Тому забезпечення здоров'я і життя в

процесі трудової діяльності, особливо при виконанні робіт, які мають ознаки підвищеної небезпеки, є дуже важливим і актуальним. Загальні принципи державної політики у сфері охорони праці, передбачають створення належних, безпечних і здорових умов праці, запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням. Оцінка реального стану охорони праці в Україні в контексті організації безпечного виконання робіт підвищеної небезпеки на підприємствах по експлуатації газового господарства є метою роботи.

Основні терміни, використані у роботі:

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності [1].

Робота підвищеної небезпеки – робота в умовах впливу шкідливих і небезпечних виробничих чинників або така, де є потреба в професійному доборі, чи пов'язана з обслуговуванням, керуванням, застосуванням технічних засобів праці або технологічних процесів, що характеризуються підвищеним ризиком виникнення аварій, пожеж, загрози життю та заподіяння шкоди.

Професійний добір – сукупність заходів, призначеність яких – добирати осіб для виконання, без ушкодження їхнього здоров'я, певного виду трудової діяльності за їхніми професійними знаннями, анатомо-фізіологічними, психофізіологічними та психологічними особливостями й віком.

Газонебезпечні роботи – роботи, під час виконання яких є або може бути виділення в робочу зону вибухо- і пожежонебезпечної або шкідливої пари, газів та інших речовин, здатних викликати вибух, загорання, в кількостях, що перевищують граничнодопустиму концентрацію, а також роботи при недостатньому вмісті кисню (об'ємна частка нижче ніж 20% у повітрі) [2].

Останні дослідження та публікації. Питання проведення газонебезпечних робіт розглядаються в таких нормативних документах: Закон України «Про охорону праці» [1], НПАОП 0.00-5.11-85 Типова інструкція з організації безпечного проведення газонебезпечних робіт [3], НПАОП 0.00-1.76-15 Правила безпеки систем газопостачання [4], ДБН А.3.2-2-2009 Охорона праці і промислова безпека у будівництві [5], Кодекс 2:2021. Газорозподільчі системи [6].

Рекомендації щодо проєктування, будівництва, контролювання за будівництвом, введення в експлуатацію та експлуатації газорозподільчих систем наведені в [6]. Уперше цим документом описане виведення з експлуатації та наведений приклад акту розмежування експлуатаційної відповідальності газової мережі та організації проведення газонебезпечних робіт.

Були розроблені Операційні карти технологічних процесів [7], у яких було

визначено порядок виконання газонебезпечних робіт, склад бригади, кваліфікаційні вимоги до працівників, тривалість виконання робіт, тощо. Проблемні питання експлуатації інженерних систем будинків і споруд під час воєнного стану розглядалось в роботі [8]. З 2024 року визначені Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров'я на роботі під час виконання газонебезпечних робіт [9]. З 2025 року діють Правила технічної експлуатації систем газопостачання [10].

Основна частина. Більшість робіт на підприємствах газового господарства є роботами підвищеної небезпеки, тобто для їх виконання потрібно попереднє спеціальне навчання і перевіряння знань з питань охорони праці. Значною частиною робіт підвищеної небезпеки на підприємствах експлуатації газового господарства є газонебезпечні роботи.

Керуючись Переліком робіт з підвищеною небезпекою [11], з урахуванням специфіки виробництва, на підприємстві експлуатації газового господарства повинно бути розроблено і затверджено перелік робіт з підвищеною небезпекою. Для проведення цих робіт необхідне спеціальне навчання і щорічне перевіряння знань з питань охорони праці.

Роботи підвищеної небезпеки повинні виконуватися бригадою не менше двох працівників, а роботи, що виконуються всередині технологічного обладнання, апаратів (резервуари, колодязі, трубопроводи та повітропроводи, посудини високого тиску, каналізаційні колектори, траншеї, тунелі або аналогічне обладнання) – бригадою в складі не менше трьох працівників. Допускається виконання робіт одноосібно, якщо це визначено нормативно-правовими документами з охорони праці [4].

Обов'язок складання наряду-допуску на виконання робіт із підвищеною небезпекою встановлюється нормативно-правовими актами з охорони праці за конкретними видами робіт. Найменування робіт, нормативний акт який регламентує оформлення наряду-допуску та посилання на додатки, де зазначені форми нарядів-допусків, наведені у Таблиці 1.

При оформленні нарядів-допусків необхідно враховувати всі небезпечні чинники, які виникають під час виконання робіт. Якщо заплановані роботи відносяться до декількох видів робіт з підвищеною небезпекою, то необхідно виписувати на кожен вид таких робіт окремий наряд-допуск згідно форм затверджених нормативно-правовими актами з охорони праці.

Проте роботи, які одночасно віднесені як до газонебезпечних, так і до вогневих та/або робіт на висоті, допускається виконувати за нарядом-допуском на виконання газонебезпечних робіт [4]. Тоді до нього повинні бути долучені вимоги безпеки під час виконання відповідних робіт.

Таблиця 1. Перелік робіт з підвищеною небезпекою,
на які потрібно оформляти наряд-допуск

Ч. ч.	Найменування робіт	Нормативний акт	Номер додатку до Порядку з формою наряду- допуску
1	Газонебезпечні роботи	НПАОП 0.00-5.11-85 [3], НПАОП 0.00-1.76-15 [4]	1
2	Роботи на висоті та роботи верхолазні. Роботи з використанням підйомників автомобільних або підвісних площадок (колисок)	НПАОП 0.00-1.15-07 [12]	4
3	Будівельні роботи	ДБН А.3.2-2-2009 [5]	6
4	Земляні роботи	ДБН А.3.2-2-2009 [5]	6
5	Роботи в діючих електроустановках	ПБЕЕС [13]	10
6	Вантажно-розвантажувальні роботи в охоронних зонах повітряних ліній електропередач	НПАОП 0.00-1.80-18 [14]	12
7	Вогневі роботи, в т. ч. зварювальні роботи, газо полум'яні роботи, що проводяться на тимчасових робочих місцях	ППБУ [15]	13
8	Вогневі роботи на вибухопожежонебезпечних та вибухонебезпечних об'єктах	НПАОП 0.00-5.12-2001 [16]	14

Примітка. Цей перелік є неповним і на кожному окремому підприємстві може дещо відрізнятись. У випадку появи додаткових робіт підвищеної небезпеки вносяться зміни в Перелік робіт, а на саму роботу потрібно оформляти наряд-допуск.

У разі виникнення в процесі роботи небезпечних та/або шкідливих виробничих факторів, не передбачених нарядом-допуском, роботи припиняються і можуть бути продовжені тільки після усунення зазначених факторів.

Наряд-допуск реєструється до виконання робіт у журналі реєстрації нарядів-допусків. Записи в журналі ведуть розбірливим почерком без виправлень. Сторінки журналу мають бути пронумеровано, прошнуровано та скріплено підписом з печаткою.

Наряд-допуск можливо заповнювати комп'ютерним набором за винятком пунктів де передбачено аналіз повітряного середовища, що проводиться до і протягом виконання роботи, та висновок про фактично виконані роботи.

На поточний час відбуваються зміни у нормативному забезпеченні, які повинні бути враховані у поточній роботі інженерно-технічних працівників, залучені до виконання підприємстві по експлуатації газового господарства. Так, у пояснювальній записці до [9] зазначено що деякі пункти, викладені у НПАОП 0.00-5.11-85 [3] створюють надмірне навантаження на суб'єкти господарювання необґрунтованим регулюванням, вони не забезпечують належного рівня безпеки, гігієни праці та виробничого середовища. Тому потреба актуалізувати вимоги щодо безпеки та здоров'я на роботі під час виконання газонебезпечних робіт є дуже важливою.

З лютого 2025 року набрали чинності «Правила технічної експлуатації систем газопостачання» (ПТЕСГ) [10]. Вони встановлюють основні технічні та організаційні вимоги до експлуатації систем газопостачання природного газу з надлишковим тиском не більше 1,2 МПа, зокрема до робіт, пов'язаних з технічним обслуговуванням та реконструкцією. Також визначають вимоги до технічного обслуговування димових і вентиляційних каналів комунально-побутових об'єктів, житлових і громадських будинків, організації виконання робіт та ведення технічної документації при експлуатації таких об'єктів.

На цей час є чинним і НПАОП 0.00-1.76-15 (ПБСГ) [3], які введені в дію 07.07.2015 року. Наявні розбіжності між ПТЕСГ та ПБСГ, зокрема в частині їх дублювання та здійснення повноважень Державною службою України з питань праці та Держенергонаглядом під час державного нагляду у сфері охорони праці на ринку природного газу. Для врегулювання цих розбіжностей Уряд постановив розробити правила з питань забезпечення безпеки та здоров'я працівників під час експлуатації систем газопостачання.

Передбачається (п. 2, ч. 3, ст. 66 Закону України «Про правотворчу діяльність»), що у разі виявлення колізії між нормативно-правовими актами різної юридичної сили пріоритет у застосуванні мають норми, що містяться у нормативно-правовому акті вищої юридичної сили. У разі виявлення колізії між

нормативно-правовими актами рівної юридичної сили пріоритет у застосуванні мають норми, що містяться у нормативно-правових актах, що вступили в дію пізніше. Тобто вимоги викладені в [10] мають пріоритетність.

На кожному підприємстві, що має газове господарство, повинен бути розроблений перелік газонебезпечних робіт (Додаток 2 [9]). У ньому повинні бути окремо вказані газонебезпечні роботи:

- проводяться з оформленням наряду-допуску (Додаток 3 [9]);
- проводяться без оформлення наряду-допуску;
- викликані необхідністю ліквідації або локалізації можливих аварійних ситуацій.

На кожному підприємстві експлуатації газового господарства повинні здійснюватися заходи щодо скорочення кількості газонебезпечних робіт і підвищенню рівня їх безпеки шляхом удосконалення технологічних процесів, впровадження сучасних методів діагностики, засобів гідравлічної, механічної, хімічної очистки технологічного обладнання та комунікацій, оснащення технологічних схем надійними засобами блокування окремих вузлів і апаратів тощо.

У більшості випадків для виконання газонебезпечних робіт оформляється наряд-допуск (Додаток 3 [9]). Проте періодично повторювані газонебезпечні роботи, які є невід'ємною частиною технологічного процесу, що характеризуються аналогічними умовами їх проведення, постійністю місця і характеру робіт, певним складом виконавців, можуть проводитися без оформлення наряду-допуску.

В умовах військового стану та наявної небезпеки пошкоджень газової мережі внаслідок обстрілів актуальним є дотримання наступних вимог, зазначених в п. 8.15 [4]:

Роботи з локалізації і ліквідації аварій проводяться без наряду-допуску та до усунення прямої загрози життю людей і пошкодженню матеріальних цінностей. Після усунення загрози роботи з приведення газопроводів і газового обладнання в технічно справний стан повинні проводитися за нарядом-допуском. Якщо аварія від початку до кінця ліквідується аварійною службою, складання наряду-допуску не вимагається

Газонебезпечні роботи, що виконуються за нарядом-допуском, як правило, повинні проводитися в денний час. У виняткових ситуаціях проведення невідкладних газонебезпечних робіт може бути дозволено в темний час доби. Газонебезпечні роботи необхідно виконувати бригадою у складі не менше двох працівників. Роботи в колодязях, тунелях, траншеях і котлованах завглибшки понад 1 м, колекторах і резервуарах повинні виконуватися бригадою у складі не менше трьох працівників.

Інженерно-технічні працівники та робітники періодично згідно з нормативними вимогами проходять перевіряння знань з питань охорони праці та медичні огляди. Керівник підприємства своїм наказом по підприємству з числа керівників чи інженерно-технічних працівників визначає працівників які мають право видавати наряди-допуски, керувати газонебезпечними роботами та наказом допускає певних працівників до виконання газонебезпечних робіт.

При ремонтних роботах у загазованому середовищі необхідно застосовувати інструменти з кольорового металу або інструменти з нанесенням спеціального покриття, яке унеможливиює іскроутворення. Інструменти та пристрої з чорного металу повинні бути обміднені або їхні робочі частини змащені консистентним змащенням. Застосування у загазованому середовищі електричних інструментів забороняється.

Особа, відповідальна за проведення газонебезпечних робіт, повинна завчасно отримувати наряд-допуск і спеціальний план виконання газонебезпечних робіт, у якому вказуються:

- послідовність проведення робіт;
- розташування працівників;
- потреба в механізмах і пристроях;
- заходи, що забезпечують безпеку проведення робіт;
- особи, відповідальні:
 - за проведення кожної газонебезпечної роботи;
 - за загальне керівництво і координацію робіт для своєчасного підготовлення до роботи.

До спеціального плану виконання газонебезпечних робіт і наряду-допуску додається схема із зазначенням місця і характеру роботи, що виконується. Перед початком проведення газонебезпечних робіт особа, відповідальна за їх проведення, повинна перевірити відповідність креслення фактичному стану об'єкта.

У наряді-допуску зазначають термін його дії, час початку і закінчення роботи. При неможливості закінчення роботи у встановлений термін наряд-допуск підлягає продовженню особою, що його видала. Наряди-допуски повинні зберігатися не менше одного року. Постійно зберігаються в архіві газорозподільного підприємства наряди-допуски:

- на візання в наявні газопроводи;
- на первинний пуск газу;
- на виконання ремонтних робіт на підземних газопроводах із застосуванням зварювання.

До початку виконання газонебезпечних робіт, що проводяться за нарядом-допуском, особа, відповідальна за їх проведення, безпосередньо на місці робіт

зобов'язана проінструктувати всіх виконавців робіт про правила безпечного ведення робіт з відміткою в наряді-допуску. У процесі виконання газонебезпечної роботи всі розпорядження повинні надаватися лише особою, відповідальною за її проведення.

Здійснення ремонту, електрогазозварювання та різання газопроводів на наявних газопроводах при приєднанні до них інших газопроводів необхідно проводити під надлишковим тиском газу 40-150 даПа, який контролюється протягом виконання роботи. При зниженні тиску нижче 40 даПа і підвищенні його понад 150 даПа різання або зварювання необхідно припинити. Для контролювання тиску в місці проведення робіт необхідно використовувати манометр, розміщений на відстані не більше ніж 100 м від місця проведення робіт. Заміна прокладок фланцевих з'єднань на зовнішніх газопроводах допускається при тиску газу в газопроводі 40-200 даПа. Розбирання фланцевих, різьбових з'єднань і арматури на внутрішніх газопроводах будь-якого тиску повинно проводитися за умови від'єднання від газопостачання і встановлення заглушки на ділянці газопроводу. Допускається змащування кранів на газопроводі низького тиску діаметром до 50 мм внутрішньої і зовнішньої систем газопостачання будинку без припинення подачі газу за умови застосування спеціальних пристроїв та дотримання необхідних заходів безпеки, передбачених інструкціями з охорони праці [4].

Значна частина газопроводів, що експлуатується, побудована понад сорок років, пункти редукування газу (ПРГ) - понад двадцять п'ять років, – засоби електрохімічного захисту (ЕХЗ) – більше десяти років. Певний залишковий строк експлуатації ще є в газопроводах з поліетиленових труб (експлуатуються менше 50 років). Тобто, згідно з [10], наявні газові мережі перевищили рекомендований строк експлуатації.

Для локалізації та ліквідації аварійних ситуацій створюється аварійно-диспетчерська служба (АДС). Чисельність та технічне оснащення АДС встановлюється керівництвом газорозподільного підприємства.

Незважаючи на зменшення фінансування та скорочення працівників, підприємства експлуатації газового господарства змогли забезпечити стійкість роботи та підтримання технічного стану системи газопостачання на належному рівні. Наявні нормативні документи розглядали експлуатацію газотранспортних підприємств лише в мирний час при достатньому фінансуванні та забезпеченні повного кадрового складу. Ситуація ускладнилася з початком широкомасштабного вторгнення росії. Відновлення пошкоджених газопроводів відбувається відповідно до вимог [17].

Сталеві підземні газопроводи повинні мати пасивний та активний антикорозійний захист. І якщо пасивний захист забезпечується, то підтримання

активного захисту періодично є проблематичним внаслідок відсутності стабільної подачі електричної енергії. Періодичне припинення подавання напруги на станції катодного захисту унеможливорює дотримання необхідного потенціалу. Можливе спрацювання захисних пристроїв на станціях катодного захисту ускладнює підтримання необхідного потенціалу. Це призведе до зниження ефективності електрохімічного захисту сталевих газопроводів.

Своєчасне проведення робіт з технічного обслуговування та ремонту газових мереж дозволяло підтримувати задовільний рівень надійності і безперебійності їх роботи. У газових господарствах забезпечувалось виконання певного об'єму робіт (згідно вимог чинних нормативів) кваліфікованими фахівцями. В умовах сьогодення є значне зростання обсягу аварійно-відновлювальних робіт з одночасно ростом їх складності, збільшення об'єму виконуваних робіт. Ситуацію ускладнює зменшення кількості досвідчених кваліфікованих працівників, внаслідок поповнення ними Збройних сил України.

Газопроводи в зоні обстрілів і уражень зазнають прямих механічних пошкоджень, пошкоджень ізоляції, стиків, вертикальних і горизонтальних зміщень з виникненням внутрішньої напруженості в стінці труби. При розриві газопроводу у внутрішню його порожнину потрапляє сміття, волога та інші предмети та речовини. Виникає необхідність, крім відновлення цілісності газопроводу, проводити роботи щодо очищенню його внутрішньої порожнини.

Висновки. Внаслідок перевищення значної частини газопроводів рекомендованого строку експлуатації, погіршується надійність систем газопостачання та зростають втрати газу при її експлуатації. Нормативні документи визначали порядок експлуатації системи газопостачання у стандартних і складних інженерно-геологічних умовах, при повному заповненні штатного розпису підприємств. Проте не описаний порядок експлуатації в умовах активних бойових дій, що ведуться в зоні роботи мережі. Наразі недостатньо нормативних документів, які регламентували б роботу газових мереж в умовах пошкоджень і руйнувань, які відбуваються на території України. На відновлення задовільного стану системи газопостачання потрібні значні кошти. Агресія росії негативно впливає на технічний стан і цілісність системи газопостачання. Мають бути запропоновані нові підходи до вирішення питань. Необхідно на час воєнних дій переглянути вимоги до кваліфікаційного рівня виконавців робіт при одночасному забезпеченні посиленого контролю з боку керівників газонебезпечних робіт та досвідчених членів бригади. Проводити позачергові навчання працівників підприємств експлуатації газового господарства правилам безпечного ведення газонебезпечних і аварійних робіт в умовах воєнних дій. Слід розробити програми навчання виконання робіт підвищеної небезпеки для фахівців, які мають освіту у суміжних сферах.

References

1. Zakon Ukrainy «Pro okhoronu pratsi» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (in Ukrainian)
2. DSTU 2293:2014 Okhorona pratsi. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61781 (in Ukrainian)
3. NPAOP 0.00-5.11-85 Typova instruktsiia z orhanizatsii bezpechnoho provedennia hazonebezpechnykh robot. diiuchy https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=50419 (in Ukrainian)
4. NPAOP 0.00-1.76-15 Pravyla bezpeky system hazopostachannia. – Kyiv: Ukrarkhbudininform, 2019.-IV, 109 s. (in Ukrainian)
5. DBN A.3.2-2-2009 Okhorona pratsi i promyslova bezpeka u budivnytstvi <https://tehnadzor.cc/pages/dbn-a-3-2-2-2009-systema-standartiv-bezpeky-praci-okhorona-praci-i-promyslova-bezpeka-u-budivnyctvi-osnovni-polojennya.php> (in Ukrainian)
6. Kodeks 2:2021. Hazorozpodilchi systemy. Rekomendatsii shchodo proektuvannia, budivnytstva, kontroliuvannia za budivnytstvom, uvedennia ta vyvedennia z ekspluatatsii hazorozpodilchykh system. Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2022, 88 s. (in Ukrainian)
7. Ekspluatatsiia system hazopostachannia. Operatsiini karty tekhnolohichnykh protsesiv. - TOV «Krympolihrafpapier», Simferopol, - 2013. - 644 s. (in Ukrainian)
8. Franchuk Yu.I., Konovaliuk V. A. Osoblyvosti ekspluatatsii inzhenernykh system budynkiv i sporud pid chas voiennoho stanu / Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohapostachannia: nauk.-tekhn. zb. / Kyivskyi natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury. – 2023.– Vyp. 44. – s. 23 -29. (in Ukrainian)
9. Proiekt nakazu Ministerstva ekonomiky Ukrainy «Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh shchodo bezpeky ta zdorovia na roboti pid chas vykonannia hazonebezpechnykh robot», dokument SED Minekonomiky ASKOD № 4708-05/7441-03 vid 21.02.2023 (in Ukrainian)
10. Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii system hazopostachannia <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1816-24#Text> (in Ukrainian)
11. NPAOP 0.00-4.12-2005 Perelik robot z pidvyshchenoiu nebezpekoiu <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0232-05#Text> (in Ukrainian)
12. NPAOP 0.00-1.15-07 Pravyla okhorony pratsi pid chas vykonannia robot na vysoti https://dnaop.com/html/1582/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-1.15-07 (in Ukrainian)
13. NPAOP 40.1-1.21-98 Pravyla bezpechnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv <https://antifire.ua/dbn/10.pdf>
14. Pravyla okhorony pratsi pid chas ekspluatatsii vantazhopidiimalnykh kraniv,

pidiimalnykh prystroiv i vidpovidnoho obladnannia.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0244-18#Text>

15. Pravyla pozhezhnoi bezpeky v Ukraini.

<https://ips.ligazakon.net/document/RE26697?an=1> (in Ukrainian)

16. NPAOP 0.00-5.12-2001 Pro zatverdzhennia Instruksii z orhanizatsii bezpechnoho vedennia vohnevnykh robot na vybukhopozhezhonebezpechnykh ta vybukhonebezpechnykh ob'iektakh <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0541-01#Text> (in Ukrainian)

17. Poriadok tekhnichnoho ohliadu, obstezhennia, otsinky ta pasportyzatsii tekhnichnoho stanu, zdiisnennia zapobizhnykh zakhodiv dlia bezavariinoho ekspluatuvannia system hazopostachannia, zatverdzhenyi Nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy vid 24.10.2011 №640 (in Ukrainian)

УДК 669.2

Associate Professor **Yurii Franchuk**,

franchuk196405@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7910-8705

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Associate Professor **Viktoriia Konovaliuk**,

konovaliuk.va@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5115-7188

Kyiv National University of Construction and Architecture

ORGANIZATION OF HIGH-HAZARDOUS WORK AT GAS UTILITY ENTERPRISES

Abstract. *The reliability of Ukraine's gas supply systems is decreasing due to the wear and tear of a significant part of gas pipelines and equipment, and destruction due to shelling of gas transportation and gas distribution networks and equipment on them. Normative documents determined the procedure for operating the gas supply system in standard and complex engineering and geological conditions, with full filling of the staff list of enterprises. However, the procedure for operation in the conditions of active hostilities conducted in the area of operation of the network is not described. Due to the increase in the volume of work and the simultaneous decrease in the number of employees, the specific workload on gas utility employees is sharply increasing. Workers are forced to solve work issues that were previously performed by related services. Currently, there are not enough regulatory documents that would regulate the maintenance and repair of gas networks in conditions of damage and destruction that occur in Ukraine. The paper proposes a number of measures to organize the safe performance of high-risk work at gas industry*

enterprises. It is necessary to review the requirements for the qualification level of work performers during military operations while ensuring enhanced control by managers of gas-hazardous work and experienced team members. To conduct extraordinary training of employees on the rules of safe conduct of gas-hazardous and emergency work in the conditions of military operations. Develop training programs for performing high-risk work for specialists with education in related fields.

Key words: hazardous work, gas-hazardous work, work permit, labor protection, gas supply.

УДК 697.91:697.97

доцентка **Олександра Череднікова**,

al.chered108@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4684-9870,

доцент **Дмитро Гузик**,

guzikd64@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2130-951X,

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

професор **Віктор Мілейковський**,

mileikovskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8543-1800,

Київський національний університет будівництва і архітектури

студент **Артем Харченко**,

haryok111@gmail.com, ORCID: 0009-0000-9113-874X,

студент **Артем Соснін**,

sosnin_artem@ukr.net, ORCID: 0009-0007-2547-6039,

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

студент **Микола Чередніков**,

nikola.cherednikov@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3498-8614,

Харківський національний університет радіоелектроніки

ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ КОРПУСУ Ф НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

Анотація. У статті висвітлені науково-обґрунтовані заходи з проведення термомодернізації громадської будівлі, які передбачають оновлення у відповідності до сучасної нормативної будівельної бази інженерних систем створення мікроклімату. Дослідження проводяться паралельно з реалізацією проєкту «Вища освіта України» з термомодернізації будівель закладів вищої освіти, який підтримується Європейським інвестиційним банком та НЕФКО. Впровадження розроблених та затверджених заходів з модернізації системи вентиляції, теплопостачання та опалення в комплексі з утепленням усіх зовнішніх огорожувальних конструкцій, за попередніми розрахунками, повинно підвищити енергоефективність будівлі навчального корпусу «Ф» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Найбільш енергоефективними заходами при реконструкції інженерних систем у цьому проєкті є влаштування автоматизованого індивідуального пункту, використання рекуператорів у системах вентиляції, утеплення трубопроводів систем опалення та теплових мереж у неопалюваних приміщеннях будівлі.

Ключові слова: термомодернізація, автоматизований індивідуальний тепловий пункт, теплова ізоляція, рекуперація теплоти.

Вступ. Термомодернізація з метою підвищення енергоефективності та удосконалення інженерних систем є важливим кроком у забезпеченні комфортного та ефективного використання будівель. У зв'язку зі зростанням цін на енергію та збільшенням екологічної свідомості, зменшення споживання енергії при забезпеченні нормативного мікроклімату в приміщеннях стають все більш актуальними. Термомодернізація та удосконалення інженерних систем можуть допомогти вирішити ці проблеми, знизити витрати на енергоспоживання та підвищити якість повітря в приміщенні. У цьому контексті, розгляд та аналіз технологій, що дозволяють забезпечити оптимальний клімат у будівлях, є особливо важливим завданням, яке дозволить досягти економічної та екологічної ефективності в будівельній галузі.

Актуальність дослідження. Дослідження в галузі термомодернізації та удосконалення інженерних систем є актуальним з кількох причин:

1. Зростання вартості енергії та підвищення екологічних ризиків ставлять перед сучасними будівлями нові вимоги до енергоефективності та екологічної безпеки, тому власники будівель шукають способи зниження витрат на роботу інженерних систем, а також покращення якості повітря у приміщеннях.
2. У багатьох старих будівлях вентиляційна система може бути застарілою та неефективною, що призводить до погіршення якості повітря та зростання ризику поширення захворювань. Тому удосконалення вентиляційної системи може допомогти не тільки знизити витрати на енергоспоживання, але й забезпечити більш комфортні та безпечні умови проживання для людей.
3. З поширенням нових технологій у будівельній галузі з'являється можливість впровадження новітніх систем вентиляції, які можуть забезпечувати не тільки енергоефективність, але й додаткові функції, як-от фільтрування повітря.

У цьому контексті, дослідження технологій термомодернізації та удосконалення вентиляційних систем має велике значення для розвитку будівельної галузі та забезпечення комфортних та безпечних умов проживання та роботи людей у будівлях.

Останні дослідження та публікації. Оскільки Україна імплементується в Європейський Союз, то важливим моментом є адаптація нормативної бази, що діє в будівництві та енергетичному аудиті до європейських норм: ДСТУ 9190:2022 [1], ДСТУ Б EN 15251:2011 [2], ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 [3]. Крім того, Україна розробляє свої власні нормативи в напрямку енергоефективності та екологічної сертифікації, зокрема СОУ ОЕМ 08.002.41.032 [4], що встановлює метод екологічної сертифікації громадських будівель в рамках системи екологічної сертифікації та маркування за ДСТУ ISO 14024:2018.

Формулювання цілей статті. Вибір сучасних технологій термомодернізації та удосконалення вентиляції, а також інших інженерних систем у будівлях з метою підвищення їх енергоефективності та забезпечення комфортних та безпечних умов для людей.

Основна частина. Під час проведення дослідження було проведено огляд інженерних систем теплопостачання, опалення та вентиляції навчального корпусу «Ф» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», в результаті чого виявлено ряд недоліків, що свідчить про неефективність роботи цих систем.

Так магістральні трубопроводи системи опалення, які розташовані на горищі та в підвалі, перебувають у незадовільному стані та не є належним чином теплоізовльовані (рис. 1).



Рис. 1 Стан теплоізоляції магістральних трубопроводів навчального корпусу «Ф» а – на горищі; б – в приміщеннях підвалу

Система теплопостачання навчального корпусу "Ф" мала проблему з відсутністю лічильника теплової енергії в тепловому вводі, що ускладнювало визначення витрати теплоти, яка припадала саме на цей корпус університету. Крім того, регулювання відпуску теплової енергії відбувалося лише двома елеваторами та засувками, що не відповідало стандартам для теплових пунктів на вводах до будівель. В індивідуальному тепловому пункті корпусу було встановлено велику кількість гілок системи опалення, які розташовувалися в хаотичному порядку у двох приміщеннях теплового пункту (рис. 2).

Система витяжної вентиляції аудиторій та кабінетів була каналною природною, що ускладнювало регулювання використання теплової енергії для її роботи. Централізована система припливної вентиляції (рис. 3) знаходиться в зруйнованому стані, морально застаріла і потребує заміни, її відновлення недоцільне і неможливе за відсутності подібних компонентів. Такий стан загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції корпусу «Ф» НУПП призвів до погіршення якості повітря та збільшення витрат енергії.

У ході цієї роботи були прийняті рішення щодо часткової заміни зношених магістральних трубопроводів системи опалення з повним їх утепленням. Товщина утеплення (рис. 4) трубопроводів, що розташовані на горищі та в підвалі навчального корпусу «Ф» приймалася згідно з ДБН В.2.5-67:2013 [5]. Для трубопроводів, що розташовані на горищі і в підвалі навчального корпусу «Ф» та виконані із труб сталевих електрозварних $\varnothing 57 \times 3$, товщина ізоляційного шару була прийнята $\delta_{із} = 50$, $\varnothing 45 \times 3 - \delta_{із} = 40$, $\varnothing 38 \times 3$, $\varnothing 32 \times 2$, $\varnothing 25 \times 2 - \delta_{із} = 30$.

Утеплення трубопроводів дозволить скоротити тепловиділення від трубопроводів в опалювальний простір підвалу від 25,7 Вт/м до 10,9 Вт/м труб та неопалювальний простір горища від 21,5 Вт/м до 14,9 Вт/м. У цілому у всьому будинку цей захід повинен скоротити додаткові витрати теплоти в простір підвалу на 10,86 кВт·год, а в неопалювальному горищі на 1,65 кВт·год.

При проєктуванні будівлі у 80-ті роки минулого століття тепловий ввід корпусу "Ф" був розділений на два елеваторні вузли, які були розташовані в двох окремих приміщеннях. Таке розміщення гребінок і арматури ускладнювало, а іноді робило неможливим регулювання роботи окремих шести гілок системи опалення. У ході виконання даної роботи було прийнято рішення після теплового лічильника та індивідуального теплового пункту встановити дві гребінки: на подавальному та зворотному трубопроводах, до яких приєднати усі шість гілок системи опалення, зі встановленням на подавальних трубопроводах кранів та балансувальних клапанів на зворотних трубопроводах, для гідравлічного балансування окремих гілок системи опалення (Рис. 5).



Рис. 2 Індивідуальний тепловий пункт корпусу «Ф» з двома елеваторними вузлами



Рис. 3 Стан елементів централізованої припливної камери



Рис. 4 Теплова ізоляція - базальтові циліндри покриті алюмінієвою фольгою завтовшки 0,5 мм

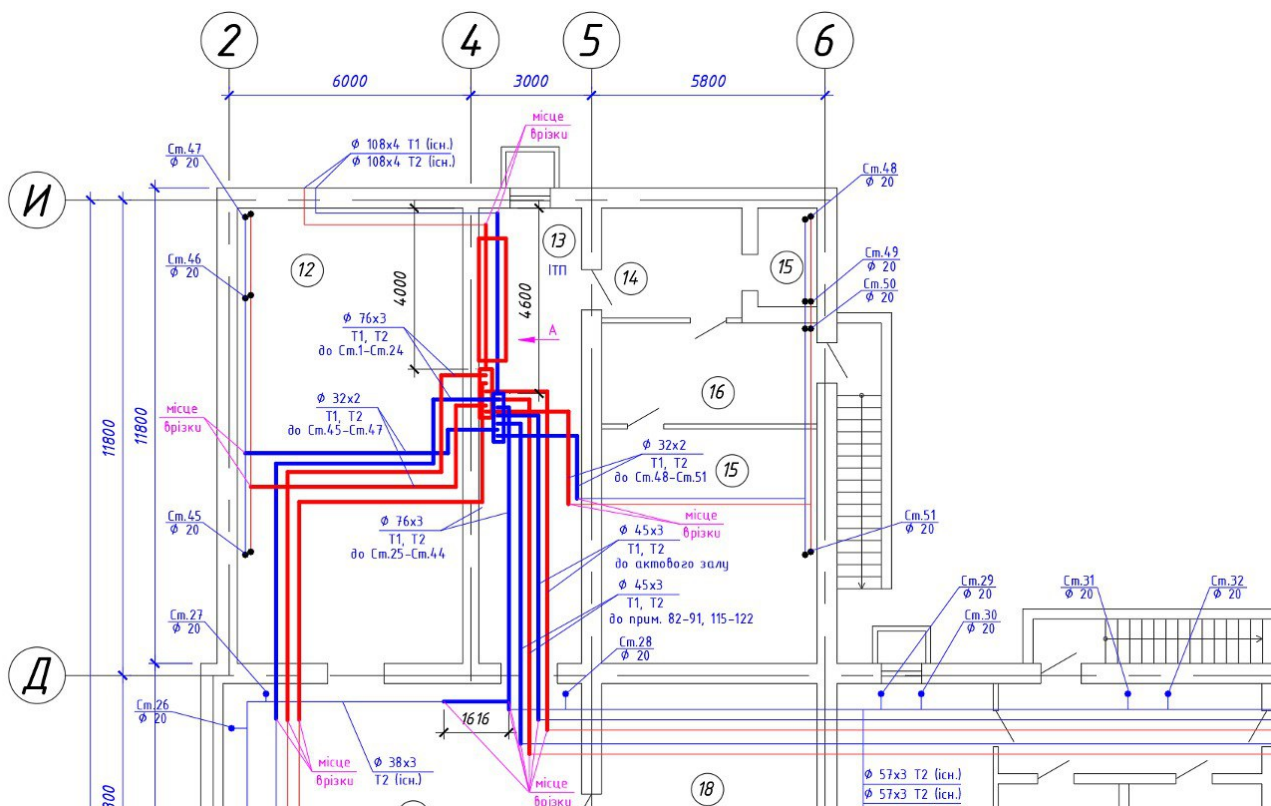


Рис. 5 План заміни трубопроводів в межах індивідуального теплового пункту та сусідніх підвальних приміщень

Гілки були поділені таким чином:

- перша – стояки Ст.1-Ст.24;
- друга – стояки Ст.25-Ст.44;
- третя – система опалення актового залу;
- четверта – приміщення під актовим залом;
- п'ята – стояки Ст.45-Ст.47;
- шоста – стояки Ст.48-Ст.51.

Розбалансування системи опалення завжди негативно відбивається на внутрішніх параметрах мікроклімату приміщень та може призвести до збільшення енергоспоживання системою опалення. Загальні тепловтрати системи опалення за конкретний місяць дорівнюють (кВт · год) [1]:

$$Q_{H,em,ls} = \left(\frac{f_{hydr} \cdot f_{im} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} - 1 \right) \cdot Q_{H,em,out},$$

де f_{hydr} – коефіцієнт гідравлічного налагодження системи, при розрахунку енергоспоживання становить $f_{hydr} = 1,01$ після реконструкції, $f_{hydr} = 1,03$ до реконструкції; f_{im} – коефіцієнт, що враховує застосування періодичного теплового режиму. В нашому випадку індивідуальний тепловий пункт дозволить застосовувати періодичний тепловий режим з регулюванням, що має інтегрований зворотній зв'язок, тому $f_{im} = 0,97$ після реконструкції та $f_{im} = 1,0$ до реконструкції; f_{rad} – коефіцієнт, що враховує променеву складову теплового потоку; η_{em} – загальний рівень ефективності для тепловіддавальної складової системи в приміщенні; $Q_{H,em,out}$ – енергія виходу підсистеми тепловідачі за i -й місяць, кВт · год.

Ефективність генерування теплоти до влаштування індивідуального теплового пункту згідно з методиками [6] і [7] становила 70 % для системи централізованого теплопостачання з центральним якісним регулюванням за температурним графіком до 110° С зі зрізкою без коригування в індивідуальному тепловому пункті. Після реконструкції прогнозована ефективність повинна досягти 95 % для централізованого теплопостачання з якісним регулюванням зі зрізкою температурного графіка і коригуванням в індивідуальному тепловому пункті за погодними умовами. Тобто заходи щодо влаштування індивідуального теплового пункту з якісним регулюванням прогнозовано повинні призвести до підвищення ефективності генерування теплоти на 25 % зі зменшенням витрат на споживання теплової енергії системою опалення.

При реконструкції в індивідуального теплового пункту навчального

корпусу «Ф» Національного університету “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” передбачено до встановлення таке обладнання:

- універсальний теплообчислювач PolluTherm 3,6 V з механічним витратоміром, виробник SENSUS, клас точності 2;
- лічильник витрати води WP-Dynamic 50/150, метрологічний клас В;
- електронний регулятор ECL Comfort 310;
- циркуляційні насоси IMP із регульованою частотою обертання електродвигуна.

Регулювання витрати та температури теплоносія системи опалення здійснюється в індивідуальному тепловому пункті за допомогою електронного регулятора ECL Comfort 310 за зовнішньою температурою повітря та температурою внутрішнього характерного приміщення (Рис. 6).

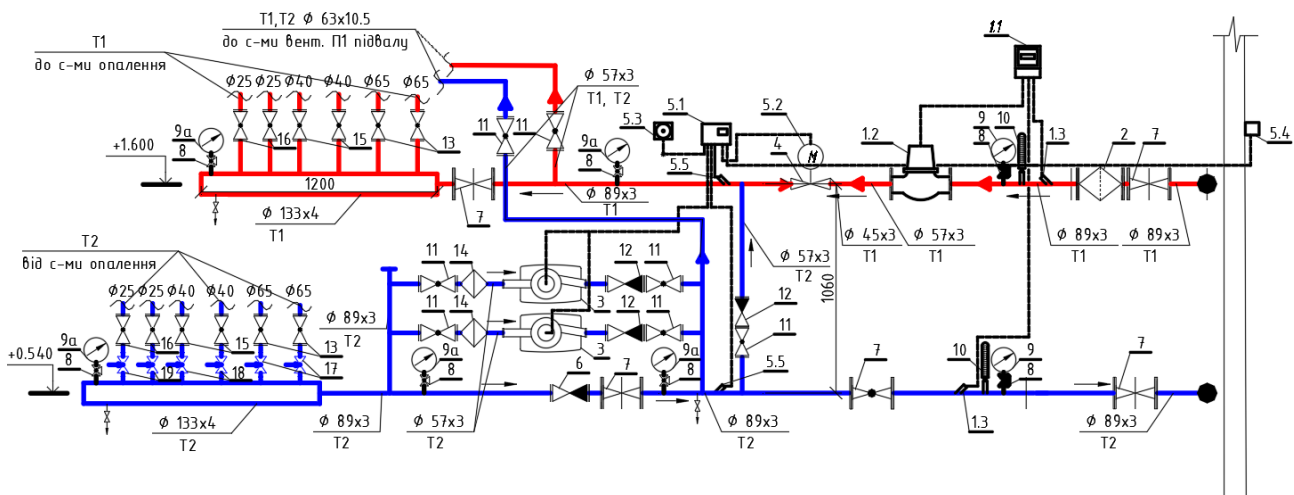


Рис. 6 – Схема автоматизованого індивідуального теплового пункту навчального корпусу «Ф»:

- 1.1 - Універсальний теплообчислювач PolluTherm; 1.2 - Лічильник гарячої води WP-Dynamic 50/150 QN 15,0 Q_{min}=0,6 м³/год, Q_{max}=30 м³/год Ø50; 1.3 - Термодатчик з втулкою;
- 2 - Фільтр фланцевий Ду = 80 мм Zetkama; 3 - Насос циркуляційний системи опалення; «IMP ECL 501-4» Ø50 L=15 м³/год Н=12 м; 4 - Регулюючий 2-х ходовий клапан VF2 KVS=25 Ø40;
- 5.1 - Електронний регулятор ECL Comfort 310 з картою P30; 5.2 - Редукторний електропривод AMV 435; 5.3 - Датчик температури внутрішнього повітря ESM-10;
- 5.4 - Датчик температури зовнішнього повітря EST-10; 5.5 - Універсальний датчик температури ESMB-12 з гільзою L=100 мм; 6 - Клапан зворотній Ø80; 7 - Кран кульовий фланцевий 11с67п 1СФ Ø80; 8 - Кран трьохходовий 11Б18бк Ø15; 9 - Манометр МТП 0-1.0 МПа; 9а Термоманометр 0-150 °С МТП 0-1.0 МПа; 10 - Термометр 0-150 °С; 11 - Кран кульовий фланцевий 11с67п 1СФ Ø50; 12 - Клапан зворотній Ø50; 13 - Кран кульовий фланцевий 11с67п 1СФ Ø65; 14 - Фільтр фланцевий Ду = 50 мм; 15 - Кран кульовий фланцевий 11с67п 1СФ Ø40; 16 - Кран кульовий фланцевий 11с67п 1СФ Ø25; 17 - Клапан балансувальний АВ-QM Danfoss Ø40; 18 - Клапан балансувальний АВ-QM Danfoss Ø25; 19 - Клапан балансувальний АВ-QM Danfoss Ø20.

Не менш важливою є реконструкція вентиляції. До проведення робіт щодо підвищення енергоефективності корпусу «Ф» будівля мала декілька централізованих припливних систем, що розташовувались у підвальному приміщенні, та декілька витяжних систем зі штучною циркуляцією повітря, вентилятори яких зосереджувалися в основному на технічному поверсі.

Витяжні системи, як і припливні, морально застаріли та зазнали механічного руйнування: демонтовані електродвигуни вентиляторів, зруйновані горизонтальні канали, відсутнє ущільнення повітропроводів та еластичних вставок (рис. 7).



Рис. 7 Залишки механічних витяжних систем вентиляції (до реконструкції)

Також приміщення корпусу, які повинні бути обладнаними системами вентиляції (аудиторії, кабінети, лабораторії, санвузли) мають різний роботи. Так наприклад, кабінети з персоналом використовують протягом робочого дня, аудиторії зайняті лише під час занять, а лабораторії – під час занять або науково-дослідницьких робіт. Це остаточно нівелює доцільність відновлення централізованих припливних систем вентиляції. Для побудови систем вентиляції зі змінною витратою повітря не вистачає фінансових ресурсів.

З урахуванням зазначеного було прийнято рішення використовувати децентралізовані вентиляційні системи з утилізацією теплоти витяжного повітря в кожному приміщенні або групі приміщень. У кабінетах та невеликих аудиторіях встановлено рекуператори PRANA 150 (93 системи). В середніх та

великих аудиторіях застосовано припливно-витяжні установки з рекуператорами та електричними догрівачами ДВУТ 300 П1(П) БЕ2 ЕС (12 систем) та ДВУТ 500 П БЕ2 ЕС (18 систем) українського виробництва ПрАТ «Вентс» (Рис. 8) для тимчасового перебування студентів та персоналу. Приміщення укріття обладнано двома припливно-витяжними системами з рекуперацією тепла ВУТ 3000 ПВ ЕС.

Всі вентиляційні системи обладнані автоматикою регулювання, яка керує системою за сигналами датчиків CO_2 в приміщенні. Такі системи будуть працювати тільки за наявності людей в аудиторіях. Рекуператори за паспортами заводів-виробників мають температурний коефіцієнт ефективності 74...95 % залежно від параметрів та витрат припливного й витяжного повітря.

Висновки: Під час виконання проєктних робіт з підвищення енергоефективності корпусу «Ф» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» була вирішена задача наукового обґрунтування доцільності прийнятих рішень під час реалізації поставленої задачі і прийняття найбільш економічно обґрунтованого технічного рішення. Впровадження розроблених та затверджених заходів з модернізації системи вентиляції, теплопостачання та опалення в комплексі з утепленням усіх зовнішніх огорожувальних конструкцій за попередніми розрахунками повинно значно підвищити енергоефективність будівлі навчального корпусу «Ф». Часткова заміна зношених магістральних трубопроводів системи опалення та їх повне утеплення згідно з вимогами ДБН В.2.5-67:2013 призводить до зменшення втрати теплової енергії на транспортування тепла, а це в свою чергу знизить витрати на опалення та збільшить ефективність роботи опалювальної системи. Встановлення автоматизованого індивідуального теплового пункту на вводі теплової мережі, який складається з лічильника теплової енергії, гребінки, регулювальної арматури, електронного контролера, що керує насосами та регулювальною арматурою залежно від температур в приміщенні та на вулиці, забезпечує точне вимірювання витрати тепла, дозволяє ефективно налаштувати роботу системи опалення та зменшити затрати на опалення. Автоматичний контролер забезпечить стабільну температуру в приміщенні, а ізоляція трубопроводів допомагає уникнути додаткових втрат тепла. Встановлення автономних системи вентиляції з рекуперацією теплової енергії в усіх аудиторіях та кабінетах, які працюють з датчиками CO_2 , дозволяє ефективно використовувати електричну енергію на потреби вентиляційних систем, а також знизить витрати на підігрів припливного повітря завдяки рекуперації тепла.

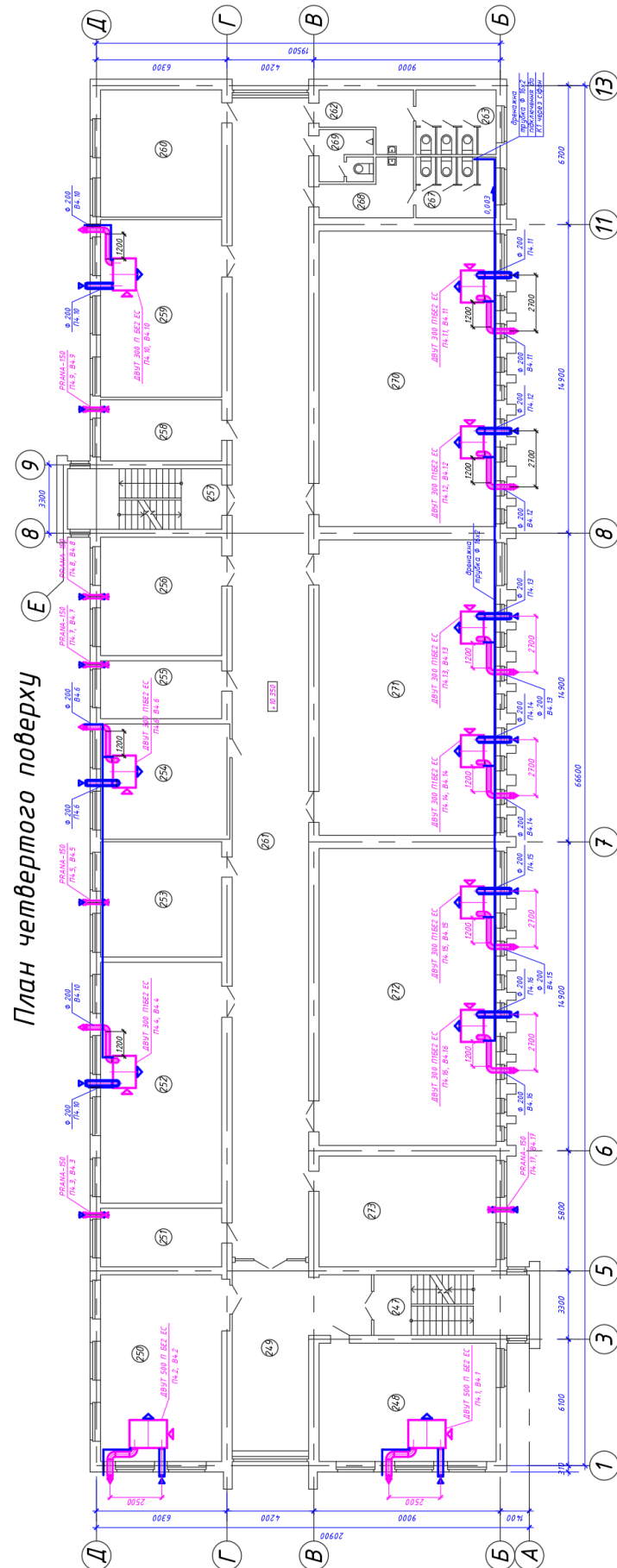


Рис. 8 План вентиляції четвертого поверху

Перспективи подальших досліджень. Наступним етапом, проведеної роботи буде визначення реального енергоспоживання системами вентиляції та теплопостачання після реалізації у спільному з Європейським інвестиційним банком та Північною екологічною фінансовою корпорацією проєкту "Вища освіта України" в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

References

1. DSTU 9190:2022. Energy performance of buildings. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water. https://gazobeton.org/sites/default/files/sites/all/uploads/dstu_91902022_energetichna_efektivnist_budivel_metod_rozrakh.pdf
2. DSTU B EN 15251:2011. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (EN 15251:2007, IDT). http://www.mathcentre.com.ua/download/dstu_en_15251-2011.pdf
3. DSTU-N B A.2.2-13:2015. Energy performance of building. Guidance on the application of energy assessment of buildings. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu-n_b_a.2.2-13_2015.pdf
4. SOU OEM 08.002.41.032:20XX. System for environmental certification and ecolabelling according to DSTU ISO 14024:2018 (ISO 14024:2018, IDT). Public buildings. Environmental criteria and method for life cycle assessment. Second draft. <https://www.knuba.edu.ua/zaproshuyemo-do-obgovorenniya-drugoyi-redakcziyi-proyektu-novyh-ekologichnyh-standativ-budivnyctva-do-rozrobky-yakyyh-zalucheni-eksperty-knuba/>
5. DBN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation and conditioning. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074971619479783152
6. Method for determining the energy efficiency of buildings With the Amendments. Approved by the Order of MINREHION of Ukraine 11 July 2018 No 261, 27.10.2020 No 261, the Order of Ministry for Development of Communities and Territories of Ukraine 27.10.2020 No 261 and the Order of Ministry for Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine 11.06.2023 No 484 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#n14>

UDC 697.91:697.97

Associate Professor **Oleksandra Cherednikova**,
al.chered108@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4684-9870,

Associate Professor **Dmytro Huzyk**,
guzikd64@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2130-951X,
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Associate Professor **Viktor Mileikovskiy**,
mileikovskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8543-1800,
Kyiv National University of Construction and Architecture

student **Artem Kharchenko**,
haryok111@gmail.com, ORCID: 0009-0000-9113-874X,
student **Artem Sosnin**,

sosnin_artem@ukr.net, ORCID: 0009-0007-2547-6039,
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

student **Mykola Cherednikov**,
nikola.cherednikov@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3498-8614,
Kharkiv National University of Radio Electronics

THERMAL MODERNIZATION AND IMPROVEMENT OF ENGINEERING SYSTEMS OF CAMPUS F OF THE NATIONAL UNIVERSITY "YURI KONDRATYUK POLTAVA POLYTECHNIC"

Abstract. *Scientifically based measures for carrying out thermal modernization of a public building, which involve updating microclimate engineering systems by the modern regulatory construction framework, were highlighted in this article. Research is conducted in parallel with the implementation of the "Higher Education of Ukraine" project, which is supported by the European Investment Bank and NEFCO. Implementation of the developed and approved measures for the modernisation of the ventilation, heat supply and heating systems in combination with the insulation of all external envelope structures, according to preliminary calculations, should significantly improve the energy efficiency of the building of the educational building 'F'. Partial replacement of worn-out heating main pipelines and their complete insulation in accordance with the requirements of DBN B.2.5-67:2013 will reduce heat energy losses for heat transportation, which in turn will reduce heating costs and increase the efficiency of the heating system. Installing an automated individual heat point at the heat network inlet, which consists of a heat meter, a comb, control valves, an electronic controller that controls pumps and control valves depending on indoor and outdoor temperatures, ensures accurate measurement of heat consumption, allows effective adjustment of the operation of the heating system and reduce heating costs. An automatic controller ensures a stable indoor temperature,*

and the insulation of pipelines helps to avoid additional heat loss. The installation of autonomous ventilation systems with heat recovery in all classrooms and offices that work with CO₂ sensors allows for efficient use of electrical energy for ventilation systems, and reduces the cost of heating the supply air through heat recovery.

Key words: Thermal modernization, automated individual heating point, thermal insulation, heat recuperation.

UDC 622.741.3.022;622.7;620.133

Professor **Oleksandr Redko**,

redko.af@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9701-3324,

Kharkiv National University of Urban Economy

Professor **Andriy Redko**,

andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0009-0003-2883-5624,

Sumy National Agrarian University

Professor **Ihor Redko**,

ihor.redko1972@gmail.com ORCID: 0009-0005-1556-0830,

Ukrainian State University of Railway Transport

Post-Graduate Student **Maksym Batyuta**,

maxico69@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5837-6063,

Kharkiv National University of Urban Economy

Post-Graduate Student **Oleg Lishchynskyy**,

mr.olmail@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5660-5349,

Post-Graduate Student **Kyryl Tsymbal**,

kyryl.srbp@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1617-8809,

Sumy National Agrarian University

A METHOD FOR ESTIMATION OF BIOMASS ENERGY UTILISATION BY BIOGAS PRODUCTION

Abstract. *Currently, about 10% of the energy in the world is biofuel energy from plant biomass. Anaerobic fermentation is a sustainable technology in waste processing and energy production. First-generation biofuels are made from dedicated feedstocks and conversion technology bioenergy crops. Second-generation biofuels are bio-based products derived from non-food feedstocks, which are agricultural and forestry feedstocks. Third-generation biofuels are produced from aquatically cultivated feedstocks. To assess the output of biogas from biomass, it is necessary to perform calculations of anaerobic fermentation processes. The well-known Buswell model allows for the theoretical determination of the amount of biomethane from a substrate with organic substances. The method estimates the output of anaerobic fermentation products based on theoretical stoichiometric evaluation. Theoretical Biochemical Methane Potential considers all organic substances as biodegradable. The amount of biomethane ($n\text{CH}_4$) is a parameter that depends on the elementary composition of organic matter. To determine $n\text{CH}_4$, measurements and calculations based on elemental analysis are required. The empirical formula of organic matter can be determined using stoichiometric equations. Higher values are obtained for grains and lignin - from 698.6 to 705.4 dm^3/kg , for wood and straw the biogas yield is from 476.5 to 514.2 dm^3/kg . Solid wastewater sludge - 570 dm^3/kg . Biogas from*

anaerobic fermentation not only represents a clean energy source but also contributes to reducing the volume of solid waste and greenhouse gas emissions. Anaerobic fermentation can also be integrated into various agricultural and industrial processes.

Key words: *Biogas, Biomethane, Anaerobic Fermentation, Biothermodynamics.*

Introduction. EU goals determine the decarbonization of the Member States. One of the directions for decarbonization is the projects of renewable gases (biogas, biomethane) and biofuels. The potential of the renewable gases industry, according to European Biogas Association (EBA) exceeds the prospects for using hydrogen. Biomethane is a biogas that is brought to a gas quality containing 95 % to 98 % of methane. The production of biomethane is carried out by the technology of anaerobic fermentation of waste and residues of agricultural biomass. Biomethane can be used for the production of thermal and electricity, as fuel for compressed and liquefied transport, as well as as a raw material for the chemical industry. In 2020, the production of biomethane in EU countries will be up to 32 TW·h. In the period up to 2050, the production of biomethane will increase from 1000 to 1400 TW·h, which will replace 20 % of the need for natural gas, according to EU plans. According to EBA, the number of biomethane plants in EU countries is 729. Germany has the highest proportion of biomethane installations (232), France-131, UK-80 [1-5].

Electricity production with biomass is possible by thermochemical technologies: burning, rapid pyrolysis and gasification. Direct combustion is the simplest way to produce thermal energy with efficiency of about 75 % and electricity with efficiency of about 8-13 %. Rapid pyrolysis is the process of rapid heating of fuel and waste in a boiling layer to high temperature in the absence of air. Charcoal particles and pyrolysis gas come out at the outlet. The electrical efficiency of technology is from 20 to 30 %, and the thermal efficiency of modern installations reaches 91-93 %. The technology of gasification of woody and plant waste is sold in high temperature and pressure with restriction of air access. The electrical efficiency is 40 %, and thermal efficiency is 40-45 %.

Gasification is thermal oxidation occurring at high temperature (750-900 °C) in the environment (steam, air, oxygen, or a mixture of them). Gasification products are gases- H_2 , CO, CH_4 , and CO_2 . There are also solid product (char), inorganic contaminants (H_2S and HCl) and organic contaminants (tar). Anaerobic Digestion (AD) is process whereby microorganisms break down biomass in the absence of oxygen. AD for biogas production involves four processes called hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis. Hydrolysis breaks down polymers like cellulose, starch, and proteins into monomers by exoenzymes. Acetate, H_2 , CO_2 ,

and volatile fatty acids (VFA) are produced during acidogenesis while acetogenesis produces acetic acid. The final process, methanogenesis runs parallel to the third to transform the CO₂ and H₂ into methane.

The basics of biogas energy generation and thermodynamic principles
(The role of thermodynamics in enhancing anaerobic digestion efficiency)

By applying thermodynamic principles to biogas energy generation, we can enhance the overall efficiency and maximize the benefits. The following are key consideration:

- Heat exchange,
- Exergy analysis,
- Entropy optimization,
- Utilizing thermodynamics for maximizing energy generation from biogas

Relevance of the research. Biogas is the promising technology of decreasing natural gas usage. Its burning simply returns the sequestered CO₂ by plants and, possibly, converted by animals. Thus, it doesn't influence the CO₂ balance in the nature instead of using fossil fuels releasing the CO₂ deposits accumulated during billion years. Biogas is a renewable resource. Thus, effective usage of it is one of the solution of global warming problem.

Latest research and publications.

The basics of biochemical processes of carbohydrate breakdown. There are two processes of carbohydrate breakdown - anaerobic breakdown of carbohydrates (glucolysis) and aerobic breakdown (oxidation) of carbohydrates. The anaerobic process of carbohydrate breakdown can be analyzed on the multi-stage process (12 intermediate stages) of the conversion of glucose into lactic acid according to the reaction [6-7] with the difference in the Gibbs energy ΔG_0 [kJ/mol]:



Glucose breakdown efficiency is 40% (cucumbers). Another direction of the process is the transformation with the participation of acetylcoenzyme and the formation of acetic acid CH₃COOH (vinegar fermentation).

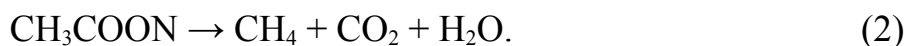
Aerobic decay (oxidation) of carbohydrates and glycolysis pass equally to the stage of formation of pyruvic acid. In the presence of oxygen, the process of converting pyruvic acid into lactic acid is inhibited and the process of oxidation of pyruvic acid, which leads to several times more release of the amount of free energy (up to 1250 kJ/mol). Fermentation refers to intracellular mechanisms. Due to fermentation, many organisms receive chemical energy from glucose and other subtractive without molecular oxygen. Fermentation is a life without air.

In 1857, the biological nature of the fermentation process caused by living cells

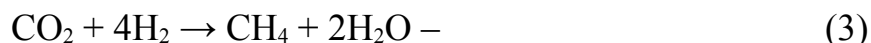
of microorganisms was proved by Louis Pasteur. He found that in aerobic conditions, yeast is formed from sugar 20 times more a small substance than in anaerobic. He found that oxygen suppresses fermentation (Louis Pasteur effect). The process of methane fermentation was studied at work [8]. The fermentation process was considered from two phases. In the first phase of complex organic substances acids (acetic, anthill, lactic, oil and others), alcohols (ethyl, propyl, butyl and others), gases (carbon dioxide, hydrogen, hydrogen sulfide, ammonia), amino acids, glycerin and others) are formed. The first phase is called acidic or hydrogen fermentation, because In the process, the excretion of acids and pH is reduced to 5-4.5. The second phase (alkaline or methane fermentation) - there is a further decomposition of substances with the release of gases consisting of methane, carbon dioxide, hydrogen and nitrogen. The Barker scheme is convenient for practical use. Other works distinguish three and four phases of decay of organic matter and different groups of bacteria. There are the following phases of methane synthesis from the substrate:

1. Hydrolysis phase. High molecular weight organic substances (protein, cellulose, carbohydrates, fats) by hydrolysis bacteria are converted to low molecular weight water-soluble compounds (monosaccharides, amino acids, fatty acids and water). The polymers turn into monomers.
2. Acid-forming phase. Organic monomers are decomposed into acids (acetic, propionic, oil), alcohols and aldehydes and compounds: H_2 , CO_2 , N_2 , H_2S . Anaerobic conditions are created necessary formation of methane bacteria.
3. Acetogenic phase. This phase is carried out by acetogenic bacteria. This forms acetate with hydrogen and acetic acid by using hydrogen to restore CO_2 .
4. Methanogenesis.

Acetic acid is decomposed into methane, carbon dioxide and water according to the reaction:



Hydrogen and carbon dioxide turn into methane and water:



stimulate the process of synthesis of biogas supplement of green amaranth plants, corn and melafen.

Acetogenation - the process of converting fatty acids, amino acids and alcohols into acetic acid at a temperature of 25°C. The duration of the process is about 24 hours with the formation of acetic acid. Methanogenic phase - methane and carbon dioxide. The duration of the process is about 14-20 days. Most bacteria form methane

of molecular hydrogen and carbon dioxide according to the reaction:



Some types of bacteria form methane from acetic acid.



The processes of methane formation of cellulose and formic acid, methanol and methylamine, carbon monoxide are known. Processes in the acid phase and methanogenic phase occur at different speeds. Acid bacteria (aerobic) double the mass for 5-10 hours. Methanogenic bacteria develop slowly and double the mass in 3-5 days.

The known McCarthy scheme [9], according to which the process of anaerobic substance occurs in three phases:

- in the first phase, complex organic substances biological polymers (proteins, lipids, polysaccharides) are subjected to hydrolysis with the formation of organic acids (oil, propionic, dairy), under the influence of microorganisms, hydrolysis of monosaccharides, organic acids and alcohols occurs, and, as a result, hydrogen, ammonia, acids are formed.
- the second phase is acetogenic microorganisms – anaerobic bacteria that convert organic acids into acetic acid, hydrogen, carbon dioxide;
- in the third phase, meta-forming bacteria break down organic matter using metabolites formed in the first phases.

Methanogens use water to recover CO_2 to CH_4



Biomass resources. The energy efficiency of plant biomass is determined by its yield and annual production [10, 11]

Let us perform the the analysis of the influence of pyrolysis parameters in thermal destruction on the composition of biofuels when using various raw materials.

Fundamental hydrolysis of cellulose from extraordinary wood. Using pre-treatment of corn cobs with a deep eutectic solvent fraction of hemicellulose and lignin of raw biomass, cellulose content increases by 140 %. Corn straw was pre-treated with microorganisms and a microbiological agent helps to reduce the process of biogas production. This reduces the content of lignin and cellulose, gas formation increases.

Table 1. Energy characteristics of biomass

Biomass	Yield/Dry matter [t/hm ²]	Energy efficiency	
		GJ/hm ²	TOE/hm ² *
Cereal straw	2,6/2,2	40,3	1,38
Potato buds	1,7/1,3	19,5	0,67
Straw rapeseed	2,5/2,1	38,2	1,30
Potato tubers	21,2/5,3	85,9	2,93
Beet	38,7/9,7	155	5,3
Corn stems	55/15	274,5	9,37
Jerusalem artichoke stems	95,7/27,5	495	16,9

* TOE – Ton of Oil Equivalent 29.3 GJ/T

Anaerobic Biomass Conversion in Methane. The output of biogas from vegetable biomass is given in Table 2 [12].

Table 2. Biogas exit from vegetable biomass

Type of raw material	Gas output, m ³ per 1 kg of dry matter	Methane content, %
Tree leaves	0,219 – 0,29	58
Corn stalks	0,38 – 0,46	59
Oat straw	0,29 – 0,31	59
Barley straw	0,25 – 0,30	59
Rye straw	0,20 – 0,30	59
Wheat straw	0,20 – 0,30	59 – 60
Beet tops	0,40 – 0,50	85
Potato tops	0,28 – 0,49	60 – 75

The energy intensity (energy) of biogas is 22.3 MJ/m³ [13]. 0.30 m³ of biogas, or 180 dm³ of methane at a concentration of 60 %, can be obtained per 1 kg of dry biomass. The energy consumption of dry biomass is 15...18 MJ/kg. When burning biogas with an energy consumption of 6.7 MJ/kg.

Processing of plant biomass is determined by technological processes or exergy. Analyzing various technologies and losses of exergy of vegetable fuel we get the following:

1. Grinding, drying and pressing, packaging (98-99 % of output energy), seal 5-10 times.
2. Fermentation (liquid fuel energy) efficiency - 30 %, low concentration of fuel components in substrates; expensive technologies;
3. Methane fermentation (methane), efficiency 30...40 %, low gas formation;
4. Thermolysis (gas synthesis, CO + H₂, efficiency 20...40 %), the disadvantage is high temperatures.

Comparing technological processes, it can be seen that solid fuels can be obtained with low loss of degradation energy and are the most promising. Experimental studies of the efficiency of transformation of aerobic fermentation products into biogas and electrical power showed that the efficiency of biomass conversion in plant was 59.87 %. The efficiency of energy products in relation to the overall energy energy reaches a low value of 27.66 %. Degradation of energy intensity is observed.

More effective is the production of animal manure (40-50 m³/10 m³ per day) or biogas (Landfillgas) from dumps [15].

The elemental composition of vegetable biomass and the highest combustion heat are shown in Table. 3. In Table 4, there are compositions of organic waste (manure). And in Table 5, there is a biogas production for different substrates and additives.

Table 3. Elementary composition of vegetable biomass and higher combustion heat

Elementary composition	Wood	Lignin	Straw	Crops
C, max. %	47...51	65,9	42...47	43...60
H, max. %	5,7...6,3	4,9	5,1...6,0	6,4...7,2
O, max. %	39...44	23,0	39,1...43,8	24...46
N, max. %	0,13...0,54	0,7	0,4...1,1	1,7...3,9
Ashiness	0,5...4,0	5,1	3,8...12,2	2,0...4,6
Higher combustion heat Q ^B , MJ/kg	18,4...19,2	20,6	15,8...17,7	17,0...26,5

Table 4. Chemical composition of organic waste (manure)

	Content, %, of				
Substrate type	C	O	S	H	N
Cattle Manure	61	12	1	8	18
Litter	82	9	0,9	1	7
Pig Manure	81	11	0,08	7	0,92
Horse Manure	77	13	0,07	9	0,75
Cattle Manure and Corn Grains	71	16	1	8	19
Pig Manure and Corn Grains	91	4	9	7	4
Horse Manure and Corn Grains	82	9	15	1	0,8

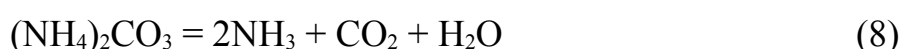
The decomposition of manure occurs through the process of anaerobic decomposition – urease urobacteria – according to the reaction:



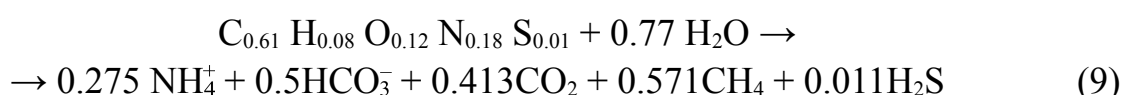
Table 5. Biogas yield from different types of substrate with active biological additives

Substrate	Biogas yield [m ³ /10 kg of substrate]		
	without additives	with the addition of corn	with the addition of the drug Medosfon
Cattle Manure	9,19	9,8	10,92
Horse Manure	7,31	9,9	11,59
Pig Manure	13,92	14,8	16,66
Chicken Manure	7,7	9,33	10,38

Ammonium carbonate decomposes:

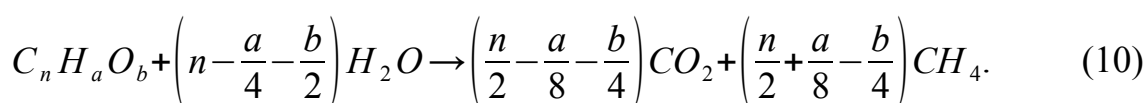


The complete decomposition of fresh cattle manure according to the conditional formula (in mass fractions of organic matter) is written as:



Hence, 0.413 g of CO₂ and 0.571 g of CH₄ will be released per 1 g of ashless substance.

Chemical composition of the degraded waste to predict methane production. The formation of methane from decomposed waste (fermentation products) can be determined from the chemical reaction as



where $\text{C}_n \text{H}_a \text{O}_b$ – organic matter; a , b – stoichiometric coefficients.

This model did not include the production of hydrogen. In the process of glucose decomposition, according to the reaction equation, methane can be obtained in the amount of: from 1.0 g C₆H₁₂O₆ we'll obtain 0.25 g CH₄, 0.69 g CO₂, 0.06 cell mass, and 632 kJ energy or (from 1 mole of glucose, 2.8 moles of CH₄ and 2.6 moles of CO₂ are obtained [15]).

The aim of the work is to estimate the possibilities of biogas production from different sources.

Main part. Currently, about 10 % of the energy produced in the world is biofuel energy obtained from the fermentation of plant biomass. Biofuels from biomass have

been widely implemented: sugar cane ethanol in Brazil, corn ethanol in the United States. Anaerobic digestion is a sustainable technology used in waste treatment and bioenergy production.

First generation biofuels are produced from dedicated on the feedstock and conversion technology bioenergy crops. Second-generation biofuels are bio-based products that come from non-food feedstock. That is agriculture and forestry feedstock. Third-generation biofuels are produced from aquatic cultivated feedstock.

The Buswell model [16] allows for the theoretical determination of the amount of biomethane from an organic substrate. The model combines chemistry, biology, mathematics and thermodynamics in a biosystem.

The stoichiometric Buswell's equation (BE_q) plays a paramount role in counting quantity of biomethane either in pure or mixed organic matters.

The equation can be written as follows:

$$C_x H_y O_z + \left(x - \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) H_2 O = \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{8} - \frac{z}{4}\right) C H_4 + \left(\frac{x}{2} - \frac{y}{8} + \frac{z}{4}\right) C O_2. \quad (11)$$

Theoretical biochemical methane potential (TBMP) considers all organic matters are biodegradable. Quantity of biomethane (nCH_4) is a parameter which depends on the elemental composition of organic matters.

To determine nCH_4 , measurements and calculations are necessary based on elemental analysis, the empirical formula of an organic matter can be determined using stoichiometric BE_q .

The most organic matters their C/H/N/S contents are analysed using elemental analysis. The mass fraction w_i [%] of elements i and of ash w_{ash} [%] in samples are in Table 6.

The mathematical relationship for ultimate analysis is shown:

$$w_{Ash} + \sum w_i = 100\%.$$

For $C_x H_y O_z Cl_s N_v S_u$ matters [%]:

$$\sum w_i = w_C + w_H + w_O + w_{Cl} + w_N + w_S.$$

For $C_x H_y O_z Cl_s N_v S_u$ matters [%]:

$$\sum w_i = w_C + w_H + w_O + w_{Cl} + w_N + w_S.$$

Mass fraction of the ash is calculated by the equation:

Table 6. Mass fraction of elements

Sample	Element/Component						
	C	H	O	Cl	N	S	Ash
	Atomic mass μ_i [g/mol]						
	12.011	1.008	15.999	35.453	14.007	32.065	–
	Mass fraction w_i [%]						
Chicken litter	45.32	5.85	27.38	0.35	5.16	0.45	15.49
Feedlot manure	45.39	5.35	30.98	1.16	0.96	0.29	15.87
Wood	47-51 (50)	5.7-6.3 (5.7)	39-44 (39)	–	0.13-0.54 (0.13)	–	0.5-40 (5.17)
Lignin	65.9	4.9	23	–	0.7	–	5.1
Straw	42-47 (47)	5.1-6.0 (5.5)	39.1-43.8 (40)	–	0.4-1.1 (1.0)	–	3.8-12.2 (6.5)
Cereals	43-60 (60)	6.4-7.2 (7.2)	24-46 (24)	–	1.7-3.9 (3.0)	–	2.0-4.6 (5.8)

Note: in parentheses, there are values considered for calculations in this work

$$w_{Ash} = 100 - \sum w_i.$$

The values taken into account in the calculations are indicated in Table 7 in parentheses.

We can convert the element to mole by dividing the mass of element per its atomic mass. Thus, the mole n relation

$$n_C : n_H : n_O : n_{Cl} : n_N : n_S = \frac{w_C}{\mu_C} : \frac{w_H}{\mu_H} : \frac{w_O}{\mu_O} : \frac{w_{Cl}}{\mu_{Cl}} : \frac{w_N}{\mu_N} : \frac{w_S}{\mu_S} = x : y : z : s : v : u \quad (12)$$

Let the mass of a waste be 100.0 g then the elemental ratios in chicken litter and feedlot manure are counted (Table 7). The empirical formulas and masses are in Table 8.

Stoichiometric coefficients BE_q are determined from the equation:

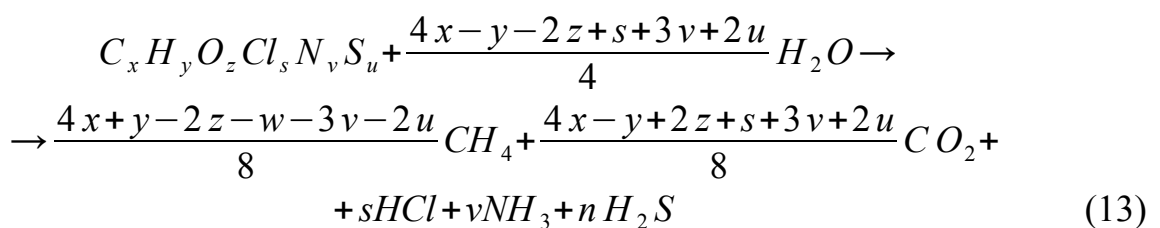


Table 7. Elements ratios

Sample/mole	$n_C = x$	$n_H = y$	$n_O = z$	$n_N = v$	$n_S = u$	$n_{Cl} = s$
Chicken litter	3.773	5.804	1.711	0.368	0.014	0.90
Feedlot manure	3.779	5.308	1.936	0.069	0.009	0.033
Wood	4.167	5.655	2.437	0.009	-	-
Lignin	5.492	4.861	1.437	0.050	-	-
Straw	3.917	5.456	2.500	0.071	-	-
Cereals	5.000	7.143	1.500	0.214	-	-

Table 8. The empirical formulas and empirical masses

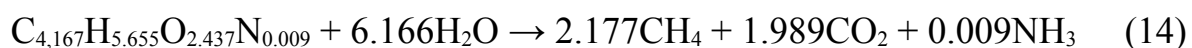
Sample	Empirical formula, $C_xH_yO_zCl_wN_vS_u$	Empirical mass, $\mu(C_xH_yO_zCl_wN_vS_u)$
Chicken litter	$C_{3.773}H_{5.804}O_{1.711}Cl_{0.010}N_{0.368}S_{0.014}$	84,510
Feedlot manure	$C_{3.779}H_{5.308}O_{1.936}Cl_{0.033}N_{0.069}S_{0.009}$	84,130
Wood	$C_{4.167}H_{5.655}O_{2.437}N_{0.09}$	94,83
Lignin	$C_{5.492}H_{4.861}O_{1.437}N_{0.050}$	94,5
Straw	$C_{3.917}H_{5.456}O_{2.500}N_{0.071}$	93,5
Cereals	$C_{5.000}H_{7.143}O_{1.500}N_{0.214}$	94,2

The values of stoichiometric coefficients are given in table 9

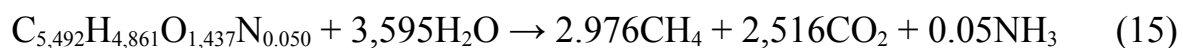
Table 9. Values stoichiometric coefficients

Sample	n_{H_2O}	n_{CH_4}	n_{CO_2}	n_{HCl}	n_{NH_3}	n_{H_2S}
Chicken litter	1,752	2,042	1,732	0,010	0,368	0,014
Feedlot manure	1,549	2,037	1,742	0,033	0,069	0,009
Wood	6,166	2,177	1,989	-	0,009	-
Lignin	3,595	2,976	2,516	-	0,050	-
Straw	1,356	1,989	1,928	-	0,071	-
Cereals	2,625	2,938	2,062	-	0,214	-

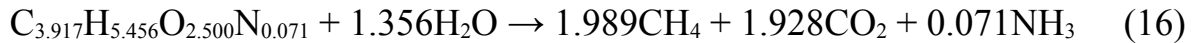
BE_q for wood:



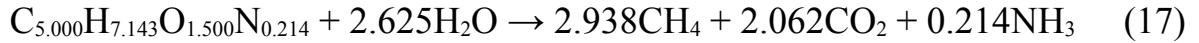
BE_q for lignin:



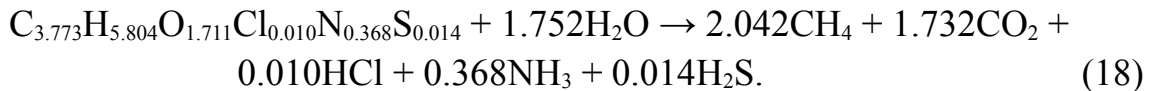
BE_q for straw:



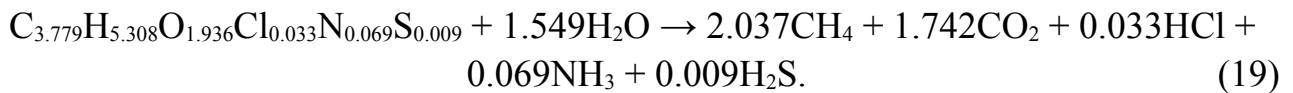
BE_q for cereals:



BE_q has the form for chicken litter:



BE_q has the form for feedlot manure:



Biomethane and biogas can be calculated by the following formula:

$$n_C = x = n_{CH_4} + n_{CO_2}$$

For mole of biomethane

$$n_{CH_4} = \frac{4x + y - 2z - s - 3v - 2y}{8}$$

Mole of biogas

$$n_{CH_4} + n_{CO_2} + n_{HCl} + n_{NH_3} + n_{H_2S} = x + s + v + n.$$

The calculation results are in table 10.

The percentage parameters of anaerobic digestion can be determined by the following two relations in per cents:

$$100 \cdot \frac{n_{biomethane}}{n_{biogas}} \quad (20)$$

$$100 \cdot \frac{n_{CH_4}}{n_{CH_4} + n_{CO_2}} \quad (21)$$

Table 10. Calculation results

Sample	Mol of biogas n_{biogas}	Mol of biometane $n_{biomethane}$	$100 \times \frac{n_{biomethane}}{n_{biogas}}$ [%]	$100 \times \frac{n_{CH_4}}{n_{CH_4} + n_{CO_2}}$ [%]	Volume, dm^3			
					CH ₄	CO ₂	NH ₃	biogas
Chicken litter	4.165	2.042	49.03	54.12	541.11	459.0	–	1103,96
Feedlot manure	3.971	2.037	51.30	53.90	542.29	463.8	–	1035.73
Wood	4.176	2.177	52.1	–	514.2	469.0	2.1	986.1
Lignin	5.542	3.013	54.4	–	705.4	596.4	11.8	1313.2
Straw	3.988	1.989	49.9	–	476.5	461.9	17.0	955.4
Cereals	5.214	2.937	56.3	–	698.6	490.3	50.9	1239.8

Using the values of elemental composition (x, y, z, s, v, u) or stoichiometric coefficients ($n_{H_2O}, n_{CH_4}, n_{CO_2}, n_{HCl}, n_{NH_3}, n_{H_2S}$) we obtain [dm^3]:

$$V_{CH_n} = \frac{22400(nC H_4)}{nC_x H_y O_z Cl_s N_v S_n}. \quad (22)$$

$$V_{biogas} = V_{CH_4} + V_{CO_2} + V_{HCl} + V_{NH_3} + V_{H_2S}. \quad (23)$$

In biotechnological systems, there are two kind of processes:

- isochoric in sealed apparatus;
- isobaric in open-type apparatus.

In isochoric processes, the volume is constant disregarding the volume change due to heating or cooling the vessel. The heat amount amount

$$Q_V = \int_1^2 (dU + pdV) = \int_1^2 dU = U_2 - U_1 = \Delta U, \quad (24)$$

where U – internal energy [J]; p – pressure [Pa]; V – volume [m^3]; U_1 – the internal energy at the beginning of a process [J]; U_2 – the internal energy at the end of the process [J]; ΔU – change of the internal energy [J].

In isobaric processes, the pressure is constant disregarding the barometric pressure change during the process. The heat amount

$$\begin{aligned} Q_p &= \int_1^2 dU + \int_1^2 p dV = U_2 - U_1 + p V_2 - p V_1 = \\ &= (V_2 + p V_2) - (V_1 + p V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H, \end{aligned} \quad (25)$$

where V_1 is the volume at the beginning of the process; V_2 is the volume at the end of the process; H_1 is the enthalpy at the beginning of the process [J]; H_2 is the enthalpy at the end of the process [J]; ΔH is the enthalpy change [J].

Hence, the heat of the process at $p = \text{const}$ or $V = \text{const}$ is a function of the state of the system. This is a consequence of the first law of thermodynamics is the theoretical basis of thermochemistry and is called Hess law.

According to the Hess's law, the thermal effects of different physicochemical processes are calculated: biochemical reactions, phase transitions, dissolution processes, etc., when there are no experimental data. In biochemical transformations there is a change in the internal energy of the system, due to the fact that the internal energy of the reaction products differs from the internal energy of the substances that reacted (the source products).

Hess's law can be formulated as: the thermal effect of a reaction that occurs at constant pressure or constant volume, does not depend on the path of the reaction, and is determined only by the condition of the starting substances and reaction products.

The thermal effect of isochoric reaction is equal to the increase in the internal energy of the system [J]:

$$Q_V = \Delta U. \quad (26)$$

The thermal effect of an isobaric reaction is equal to the increase in the enthalpy of the system [J]:

$$Q_p = \Delta H. \quad (27)$$

The thermal effect of the endothermic reaction (which occurs with heat absorption) is taken positive, and for the exothermic reaction, the thermal effect will be negative (reaction with heat release).

When streamlining thermochemical equations of reactions, the aggregate state of reagents should be indicated: (T) - solid, (P) - liquid, (d) - gaseous.

Using the consequences of Hess's law, it's possible to calculate the value of thermal effects for biochemical reactions.

For comparison and use in calculations, thermal effects are calculated under standard conditions: pressure $p = 101325$ Pa and temperature $T = 298.15$ K (25 °C).

The thermal effect under standard conditions is denoted as $\Delta_R H^0$ (R means "reaction").

The standard thermal effect of the reaction is equal to the difference of standard heat formation of reaction products and starting substances (taking into account the stoichiometric coefficients):

$$\Delta_r H^0 = \sum (V_i \Delta H_i^0 A_i) - \sum (V_j \Delta H_j^0 A_j), \quad (28)$$

where i is the number of each initial material and j is the number of each final products.

The standard heat (enthalpy) of the formation of a substance ΔH_f^0 [J] (f means "formation") is the thermal effect of the reaction of the formation of one mole of this substance from simple substances (or elements) taken in the thermodynamically stable state at $T = 298.15$ K and $p = 101325$ Pa.

The heat of the formation of simple substances in thermodynamically stable state under standard conditions is taken equal to zero ($\Delta H_f^0(\text{O}_2) = 0$).

Knowing the thermal effect of the formation of a chemical compound in one aggregate state, it is possible to calculate the thermal effect of its formation in another aggregate on the basis of Hess's law:

$$\Delta H_f(d) = \Delta H_f(P) + \Delta H_{\text{evaporation}}, \quad (29)$$

$$\Delta H_f(P) = \Delta H_f(d) + \Delta H_{\text{melting}}, \quad (30)$$

where $\Delta H_{\text{evaporation}}$ – the enthalpy of evaporation [J]

There are three kinds of information that we must have for biochemical engineering: balances, kinetics and thermodynamics.

The standard molar enthalpy of combustion h_c^0 [kJ/mol] of organic matter is proportional to the number of electrons that it transfers to oxygen during combustion [7, 17]

$$h_c^0 = -111.19 \cdot E \quad (31)$$

Where 111.19 kJ/mol is the energy amount per electron; E is the number of electrons transferred to oxygen during combustion to $\text{CO}_2(\text{g})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\text{N}_2(\text{g})$, $\text{P}_4\text{O}_{10}(\text{s})$, $\text{SO}_3(\text{g})$ [kJ/mol]:

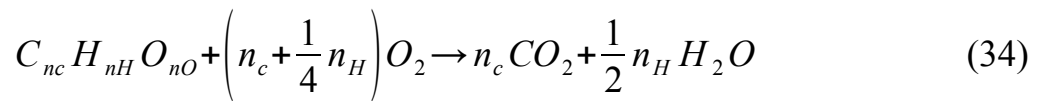
$$(\bar{h}_f^o)_{bio} = n_c (\bar{h}_f^o)_{CO_2} + \frac{1}{2} n_H (\bar{h}_f^o)_{H_2O} - \bar{h}_c^o$$

$$\bar{h}_{f(bio)}^o = n_{CO_2} \cdot \bar{h}_{f(CO_2)}^o + n_{H_2O} \cdot \bar{h}_{f(H_2O)}^o - n_C \cdot \bar{h}_{f(C)}^o \quad (32)$$

or

$$\bar{h}_{f(bio)}^o = \frac{\bar{h}_{f(bio)}^o}{M_{r(bio)}} \quad (33)$$

for the reaction



Standard molar entropy can be determined according to the equation [7].

$$\bar{S}_{bio}^o = 0,187 \sum_i \frac{\bar{S}_i^o}{a_i} n_i, \quad (33)$$

Where n_i is the number of atoms of element in the empirical formula of the biomass, $\bar{S}_i^o$ – standard molar entropy of element i [kJ/mol], a_i – the number of atoms per molecule of element i in its standard state elemental form.

The standard state elemental form of carbon is graphite, which is simply written as C, which makes $a_C = 1$. The hydrogen, oxygen and nitrogen are in their standard state in elemental forms. All diatomic gasses H_2 , O_2 and N_2 , respectively, which implies that $a_H = a_O = a_N = 2$.

Equation (34) can be used to predict standard specific entropy of a wide range of organic substances.

The equation for $\bar{S}_{bio}^o$ looks like:

$$\bar{S}_{bio}^o = 0,187 \left(\bar{S}_C^o n_C + \frac{\bar{S}_{H_2}^o}{2} n_H + \frac{\bar{S}_{O_2}^o}{2} n_O + \frac{\bar{S}_{N_2}^o}{2} n_N \right) \quad (35)$$

Since the empirical formula contains $n_c = 1$ carbon atoms, $n_H = 1.770$ hydrogen atoms, $n_O = 0.490$ oxygen atoms, $n_N = 0.240$ nitrogen atoms.

The standard molar entropies [18] are:

$$\bar{S}_C^o = 5.51 \text{ J / mol} \cdot \text{K}; \bar{S}_{H_2}^o = 130,68 \text{ J / mol} \cdot \text{K}; \bar{S}_{O_2}^o = 205.15 \text{ J / mol} \cdot \text{K};$$

$$\bar{S}_{N_2}^o = 191.61 \text{ J / mol} \cdot \text{K}.$$

Specific enthalpy and specific entropy depending on temperature can be calculated as:

$$h_f^t = h_f^o + h_{cor} = h_f^o + C_p (T - T_o), \quad (35)$$

$$S^t = S^o + S_{cor} = S^o + C_p \ln \left(\frac{T}{T_o} \right), \quad (36)$$

where C_p – specific heat capacity; h_{cor} and S_{cor} are corrections that need to be made from $T_o = 298.15 \text{ K}$ to T .

The specific heat capacity of dry biomass is $1.308 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ [7].

Using the values $\bar{h}_{f,bio}^o$ and $\bar{S}_{f,bio}^o$ determines the standard molar Gibbs free energy of formation using the Gibbs equation [J/mol]:

$$g_{f,bio}^o = \bar{h}_{f,bio}^o - T_o \cdot \bar{S}_{f,bio}^o, \quad (37)$$

Table 12. Standard molar enthalpy, entropic, Gibbs free energy

Substance	ΔH^o [KJ/mol]	ΔG^o [KJ/mol ⁻¹]	ΔS^o [J/(mol·K)]
H ₂ (g)	0	0	130.6
H ₂ O(c)	-285.9	-237.2	70.0
H ₂ O(g)	-241.8	-228.6	188.7
CO(g)	-110.5	-137.3	197.9
C(s)	0	0	5.7
CO ₂ (g)	-393.7	-394.6	213.8
N(g)	0	0	191.4
O ₂ (g)	0	0	205.0
S(g)	0	0	31.9
CH ₄ (g)	-74.6	-50.5	186.3
CH ₃ CHOHCOOH(T)	-694.08	-522.92	142.26
CH ₃ COCOOH(P)	-584.5	-468.38	179.5
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (T)	-222.1	-1544.65	360.2
C ₆ H ₁₂ O ₆ T	2802.04	205.03	29.37
Cr	0	0	5.74
CO ₂ r	-393.51	0	213.66
H ₂ O	-241.81	0	188.74
CH ₄	-74.85	0	186.27
CH ₃ COOH	-484.1	-389.36	159.83

To estimate the effectiveness of processes, we need performing not only energy, but also the exergy analysis.

The mass, energy and exergy balance equations are presented here. The governing equations for mass conservation are

$$\Sigma M_{in} - \Sigma M_{out} = 0, \quad (38)$$

where ΣM_{in} – the sum of all masses of components before the process; ΣM_{out} – the sum of all final products.

The first law of thermodynamics gives the energy balance

$$Q - W = M_{out} - M_{in}, \quad (39)$$

where Q – supplied heat [J]; W – performed work [J].

The exergy balance equation [J]:

$$Ex_{in} - Ex_{out} = Ex_{dest}, \quad (40)$$

where Ex_{in} – the total exergy before the process [J]; Ex_{out} – the total exergy after the process [J]; Ex_{dest} – the exergy destruction [J].

The total exergy rate of each component is calculated using the equation [J]

$$Ex = ex_{ph} - ex_{ch}, \quad (41)$$

where ex_{ph} – the specific physical exergy; ex_{ch} represents the specific chemical exergy. ex_{ph} for the water, organic streams, and biogas streams are determined respectively using:

$$ex_{ph} = h_t - h_0 - T \cdot (s_t - s_0); \quad (42)$$

$$ex_{ph} = C_p (T - T_0 - T_0 \cdot \ln(T/T_0)); \quad (43)$$

$$Ex_{ph} = Cp \cdot (T - T_0 - T_0 \cdot \ln(T/T_0) + RT_0 \ln(p/p_0). \quad (44)$$

The specific chemical exergies of the organic streams are calculated using the model of Song et al [19]

$$Ex_{ch} = 369.439 C + 1075.633 H - 86.308 O + 4.14 N + 190.798 S - 21.1 Ash, \quad (45)$$

where C , H , O , N , S , and Ash determine the the organic content of the substances, which are carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, sulfur, and ash, respectively.

The exergy destruction for each state point is defined as [J]

$$Ex_{dest} = (1 - T_0/T) \cdot Q_i - W + M_{in} \cdot ex_{in} - M_{out} \cdot ex_{out}. \quad (46)$$

Energy and exergy the efficiency of biogas systems is carried out according to [20]

The maximum exergy efficiency of 35.52 % was attained at organic loading rates of 0.5 dm³/day and hydraulic retention time of 15 days when food waste with fat concentration of 0.5 % was used. The exergy loss associated with irreversibility of AD, the biogas, liquid sludge and net waste heat accounted for 64.59 %, 23.19 %, 9.16 %, 2.96 % respectively.

Conclusions. The results allow assessing the potential of biogas production from various raw materials. The proposed methodology for calculating the output of biogas gives the opportunity to predict the biogas release. The proposed methodology of thermodynamic analysis of the anaerobic fermentation process and the exergy analysis showed that the exergy efficiency of the process is about 35.52 %.

References

1. Elliston, Ben, et al. "Comparing Least Cost Scenarios for 100% Renewable Electricity with Low Emission Fossil Fuel Scenarios in the Australian National Electricity Market." *Renewable Energy*, vol. 66, June 2014, pp. 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.010>.
2. Mason, I. G., et al. "A 100% Renewable Electricity Generation System for New Zealand Utilising Hydro, Wind, Geothermal and Biomass Resources." *Energy Policy*, vol. 38, no. 8, Aug. 2010, pp. 3973–3984. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.022>.
3. Jacobson, Mark Z., et al. "100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight (WWS) All-Sector Energy Roadmaps for the 50 United States." *Energy & Environmental Science*, vol. 8, no. 7, 2015, pp. 2093–2117. <https://doi.org/10.1039/C5EE01283J>.
4. Zappa, William, et al. "Is a 100% Renewable European Power System Feasible by 2050?" *Applied Energy*, vol. 233–234, Jan. 2019, pp. 1027–1050. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>.
5. Popovic, Marko, et al. "Thermodynamics of Microbial Consortia: Enthalpies and Gibbs Energies of Microorganism Live Matter and Macromolecules of E. Coli, G. Oxydans, P. Fluorescens, S. Thermophilus and P. Chrysogenum." *Journal of Biotechnology*, vol. 379, Jan. 2024, pp. 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.11.001>.
6. Peirce, C. A. E., et al. "Phosphorus Availability in Chicken Manure Is Lower with Increased Stockpiling Period, despite a Larger Orthophosphate Content." *Plant and Soil*, vol. 373, no. 1–2, Dec. 2013, pp. 359–372.

- <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1807-9>.
7. Battley, Edwin H. “The Development of Direct and Indirect Methods for the Study of the Thermodynamics of Microbial Growth.” *Thermochimica Acta*, vol. 309, no. 1–2, Jan. 1998, pp. 17–37. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(97\)00357-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(97)00357-2).
 8. Pine, Martin J., and H. A. Barker. “Studies On The Methane Fermentation XII: The Pathway of Hydrogen in the Acetate Fermentation.” *Journal of Bacteriology*, vol. 71, no. 6, June 1956, pp. 644–648., <https://doi.org/10.1128/jb.71.6.644-648.1956>.
 9. O'Regan, Gerard. “John McCarthy.” *Giants of Computing*, by Gerard O'Regan, Springer London, 2013, pp. 183–85. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5340-5_39.
 10. Rafiq, Muhammad Khalid, et al. “Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (*Zea Mays* L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance.” *PLOS ONE*, edited by Jie Zheng, vol. 11, no. 6, June 2016, p. e0156894. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156894>.
 11. Ozcan, Hasan, and Ibrahim Dincer. “Thermodynamic Analysis of a Combined Chemical Looping-Based Trigeneration System.” *Energy Conversion and Management*, vol. 85, Sept. 2014, pp. 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.011>.
 12. Bejan, Adrian, et al. *Thermal Design and Optimization*. Wiley, 1996.
 13. Momoh, Oly, and Li Nwaogazie. “Effect of Waste Paper on Biogas Production from Co-Digestion of Cow Dung and Water Hyacinth in Batch Reactors.” *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, vol. 12, no. 4, June 2010. <https://doi.org/10.4314/jasem.v12i4.55245>.
 14. Schultheiß, J., et al. “Domain Wall-Grain Boundary Interactions in Polycrystalline $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.7}\text{Ti}_{0.3})\text{O}_3$ Piezoceramics.” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 12, Sept. 2020, pp. 3965–3973. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.054>.
 15. Kashyap, D. R., et al. “Biomethanation under Psychrophilic Conditions: A Review.” *Bioresource Technology*, vol. 87, no. 2, Apr. 2003, pp. 147–153. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00205-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00205-5).
 16. Yuen, Pong Kau, and Cheng Man Diana Lau. “Buswell’s Equation for Quantifying Biohydrogen.” *International Journal of Chemistry*, vol. 16, no. 1, Mar. 2024, p. 78. <https://doi.org/10.5539/ijc.v16n1p78>.
 17. Pullen, Tim. *Anaerobic Digestion--Making Biogas--Making Energy: The Earthscan Expert Guide*. Routledge, Taylor & Francis Group, 2015.
 18. Atkins, Peter, et al. *Atkins’ Physical Chemistry*. 12th ed., Oxford University

- Press, 2022. <https://doi.org/10.1093/hesc/9780198847816.001.0001>
19. Bochmann, Günther. "Storage and Feedstock Preparation." *Substitute Natural Gas from Waste*, Elsevier, 2019, pp. 49–62. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815554-7.00004-0>.
20. Bamisile, Olusola, et al. "A Biomass-Integrated Comprehensive Energy System: Thermodynamics Assessment and Performance Comparison of Sugarcane Bagasse and Rice Husk as Input Source." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 47, no. 1, Dec. 2025, pp. 316–333. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1824037>.

UDC 622.741.3.022;622.7;620.133

Професор **Олександр Редько**,

Redko.af@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9701-3324,

Харківський національний університет міського господарства

Професор **Андрій Редько**,

andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0009-0003-2883-5624,

Сумський національний аграрний університет

Професор **Ігор Редько**,

igor.redko1972@gmail.com ORCID: 0009-0005-1556-0830,

Український державний університет залізничного транспорту

Аспірант **Максим Батюта**,

maxico69@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5837-6063,

Харківський національний університет міського господарства

Аспірант **Олег Ліщинський**,

mr.olmail@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5660-5349,

Post-Graduate Student **Кирил Цимбал**,

Kyryl.srbp@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1617-8809,

Сумський національний аграрний університет

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ БІОМАСИ ШЛЯХОМ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Анотація. На даний час близько 10% енергії, що виробляється у світі – це енергія біопалива, одержуваного в результаті ферментації рослинної біомаси. Біопаливо з біомаси отримало широкомасштабне використання: етанол із цукрової тростини в Бразилії, етанол із кукурудзи в США. Анаеробне бродіння це стійка технологія, що використовується при переробці відходів та виробництві енергії. Перші покоління біопалив виготовлені з сировини за технологією перетворення біоенергетичних культур.

Біопаливо другого покоління – це продукти на біологічній основі, що виробляються з використанням нехарчової сировини сільськогосподарського і лісового походження. Третє покоління біопалив вироблено з водної сировини.

Для оцінки виходу біогазу з біомаси необхідно виконати розрахунки процесів анаеробного бродіння. Широко відома модель Базуела дозволяє теоретично визначити кількість біометану із субстрату з органічних речовин. Модель поєднує хімічні, біохімічні і термодинамічні процеси, що відбуваються в біосистемі. Метод Базуела оцінює вихід продуктів анаеробного бродіння на основі теоретичної стехіометричної оцінки. Теоретичні біохімічні метанові потенціали (ТВМР) розглядають всі органічні речовини як біорозкладні. Кількість біометану ($n\text{CH}_4$) є параметром, який залежить від елементарної композиції органічної матерії. Для визначення $n\text{CH}_4$ необхідні вимірювання і розрахунки, що базуються на елементному аналізі, а емпіричну формулу органічної речовини можна визначити за допомогою стехіометричного методу.

Більш високі значення отримані для зернових та лігніну - від 698.6 до 705.4 $\text{дм}^3/\text{кг}$, для деревини та соломи вихід біогазу становить від 476.5 до 514.2 $\text{дм}^3/\text{кг}$. Твердий осад стічних вод дає 570 $\text{дм}^3/\text{кг}$.

Біогаз, одержуваний у процесі анаеробного бродіння, не тільки є чистим джерелом енергії, але також сприяє зменшенню об'єму твердих відходів та зниженню викидів парникових газів. Це відбувається завдяки зменшенню утворення метану, який зазвичай виділяється під час розкладання органічних відходів у природних умовах. Анаеробне бродіння також може бути інтегроване в різні сільськогосподарські та промислові процеси, що дозволяє значно підвищити ефективність використання ресурсів.

Використання різних типів біопалива, як-от біодизель, біогаз та біоетанол, має важливе значення для переходу до більш стійкої енергетичної системи. Біодизель можна отримувати з різних видів рослинної олії та відходів харчової промисловості, що робить його перспективним заміником традиційного дизельного палива. Використання біоетанолу у транспортному секторі допомагає зменшити залежність від викопних палив та скоротити викиди шкідливих речовин.

Ключові слова: біогаз, біометан, анаеробне бродіння, біотермодинаміка.

УДК 622.741.3.022;622.7;620.133

доцент **Олександр Любарець**,

liubarets.op@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1905-9283,

аспірант **Максим Микитенко**,

mykytenko_mr@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2891-6136,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ДИСКОВОГО РОЗПИЛЮВАЧА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПИЛОВЛОВЛЕННЯ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОТОКІВ

У статті представлено результати експериментального дослідження процесу очищення аспіраційних викидів підвищеної температури з використанням пиловловлювача циклонного типу, оснащеного дисковим водорозпилювачем. Основну увагу зосереджено на впливі конструктивних параметрів розпилювача, фізико-хімічних властивостей робочої рідини та режимів її подачі на геометрію факела розпилу, дисперсність крапель і ступінь уловлювання пилу. Встановлено, що розміри дисків, форма і кількість отворів, швидкість обертання, а також температура та вологість газового потоку істотно впливають на ефективність процесу очищення. Проведено вимірювання висоти та ширини факела, визначено залежності між відстанню від диска і висотою факела. Запропоновано емпіричні моделі для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель залежно від режимних параметрів. Досліджено вплив домішок у воді на якість розпилу та властивості аерозолі. Результати оптимізації режиму роботи пиловловлювача свідчать про можливість досягнення високої ефективності очищення (до 96–98%) при зниженні гідравлічного опору до 100 Па. Представлені результати можуть бути використані для вдосконалення промислових систем аспіраційного очищення в умовах високотемпературних виробництв.

Ключові слова: *дисковий розпилювач; аспіраційні викиди; пиловловлення; факел розпилу; дисперсність крапель; рециркуляція рідини; гідравлічний опір.*

Вступ. Однією з актуальних проблем промислової екології залишається ефективне очищення запиленого повітря, що утворюється під час функціонування технологічних установок. Особливо складним є очищення високотемпературних аспіраційних викидів, які містять дрібнодисперсний пил та часто потребують повторного використання води, що містить механічні домішки. В умовах зростаючих вимог до енергоефективності та екологічної

безпеки зростає потреба в удосконаленні апаратів мокрого очищення, здатних стабільно працювати у складних середовищах.

Серед найбільш перспективних технічних рішень виділяються дискові водорозпилювачі, які забезпечують рівномірне диспергування рідини у вигляді аерозольного факела. Вони дозволяють інтенсифікувати процеси масообміну між рідиною та запиленим потоком і мають потенціал для покращення ступеня очищення при зменшенні водоспоживання. Проте ефективність таких систем значною мірою залежить від геометрії розпилювача, швидкісного режиму обертання дисків, фізико-хімічних властивостей рідини та температурно-вологісних умов середовища.

Актуальність дослідження полягає у необхідності детального вивчення впливу зазначених параметрів на ефективність пиловловлення та у створенні математичних моделей, які дозволять оптимізувати роботу пиловловлювача в умовах реального виробництва. Дана робота спрямована на експериментальне обґрунтування цих взаємозв'язків та визначення раціональних параметрів процесу.

Актуальність дослідження. Сучасні умови експлуатації промислових підприємств вимагають не лише ефективного очищення повітря від пилу, а й дотримання принципів ресурсозбереження, зокрема повторного використання води та зниження енерговитрат. Особливої складності набуває очищення аспіраційних викидів із підвищеною температурою та високим вмістом твердих частинок, де традиційні мокрі пиловловлювачі виявляють обмежену ефективність.

Дискові розпилювачі, здатні формувати сталий факел водяного аерозолі необхідної дісперсності, який має підвищений потенціал для захоплення часток пилу. Проте впровадження таких систем у промислові умови потребує чіткого розуміння впливу конструктивних параметрів, гідродинамічних характеристик, фізико-хімічних властивостей зворотної рідини та теплових факторів на загальну ефективність очищення.

Дослідження, спрямовані на оптимізацію конструкції дискових розпилювачів і режимів їх роботи з урахуванням температури, вологості та домішок у воді, є актуальними з погляду підвищення екологічної безпеки та ефективності аспіраційних систем. Результати таких досліджень можуть стати основою для створення енергоефективних і технологічно адаптивних пиловловлювальних апаратів нового покоління.

Останні дослідження та публікації. У попередніх дослідженнях було проведено комплексну оцінку ефективності пиловловлювачів циклонного типу з дисковими розпилювачами, зокрема в умовах рециркуляції пило-водяної

суспензії. У публікації [1] було проаналізовано конструктивні відмінності різних типів мокрих пиловловлювачів, наведено порівняння ступеня очищення залежно від стану диспергованої фази та надано рекомендації щодо вибору апаратів для різних видів аерозольних забруднень. Особливу увагу приділено впливу фізико-хімічного складу пилу на вибір методу очищення.

У статті [2] розроблено математичну модель руху частинок у закрученому потоці в межах циклонного апарата, яка враховує як відцентрові, так і інерційні сили, а також взаємодію з краплями рідини. Представлена модель дозволила отримати аналітичні залежності для оцінки ефективності осадження частинок і використовувалась для верифікації експериментальних результатів.

У роботі [3] проведено комплексний аналіз конструктивних рішень і принципів дії різних типів апаратів для очищення газових викидів, зокрема мокрих скрубєрів, циклонів і електрофільтрів. Автори приділили особливу увагу вибору методів очищення залежно від дисперсного складу пилу, витрати газу та умов експлуатації. Описано вплив температури, вологості та аеродинамічних характеристик на ефективність уловлювання частинок різного розміру. Підкреслено важливість оптимального поєднання гідродинамічних параметрів і конструкції пиловловлювача для досягнення високих показників очищення за знижених витрат води та енергії.

Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, низка питань залишалася відкритою, зокрема вплив конструктивних параметрів дискового розпилювача на геометрію факела, стабільність краплевиділення при високій температурі та поведінка системи в умовах зміни вологості запиленого газу. Саме цим аспектам присвячене дане дослідження.

Формулювання цілей статті. Метою даної статті є дослідження впливу конструктивних параметрів дискового водорозпилювача, фізико-хімічних властивостей робочої рідини та параметрів запиленого газового потоку на ефективність очищення аспіраційних викидів підвищеної температури.

У межах поставленої мети передбачається встановити оптимальні геометричні та режимні умови формування водяного факела, що забезпечують максимальне уловлювання пилу при мінімальному гідравлічному опорі системи. Також досліджується доцільність використання зворотної води з механічними домішками, а також розробка емпіричних моделей для прогнозування ефективності пиловловлення залежно від умов експлуатації.

Конструкція та характеристики дискового розпилювача. Для дослідження процесу очищення аспіраційних викидів було використано спеціально спроектований експериментальний стенд, основним елементом якого є дисковий водорозпилювач з конусною насадкою. Ця конструкція

дозволяє створювати тонкодисперсний факел, забезпечуючи інтенсивну взаємодію рідини з частинками пилу в газовому потоці (рис. 1).

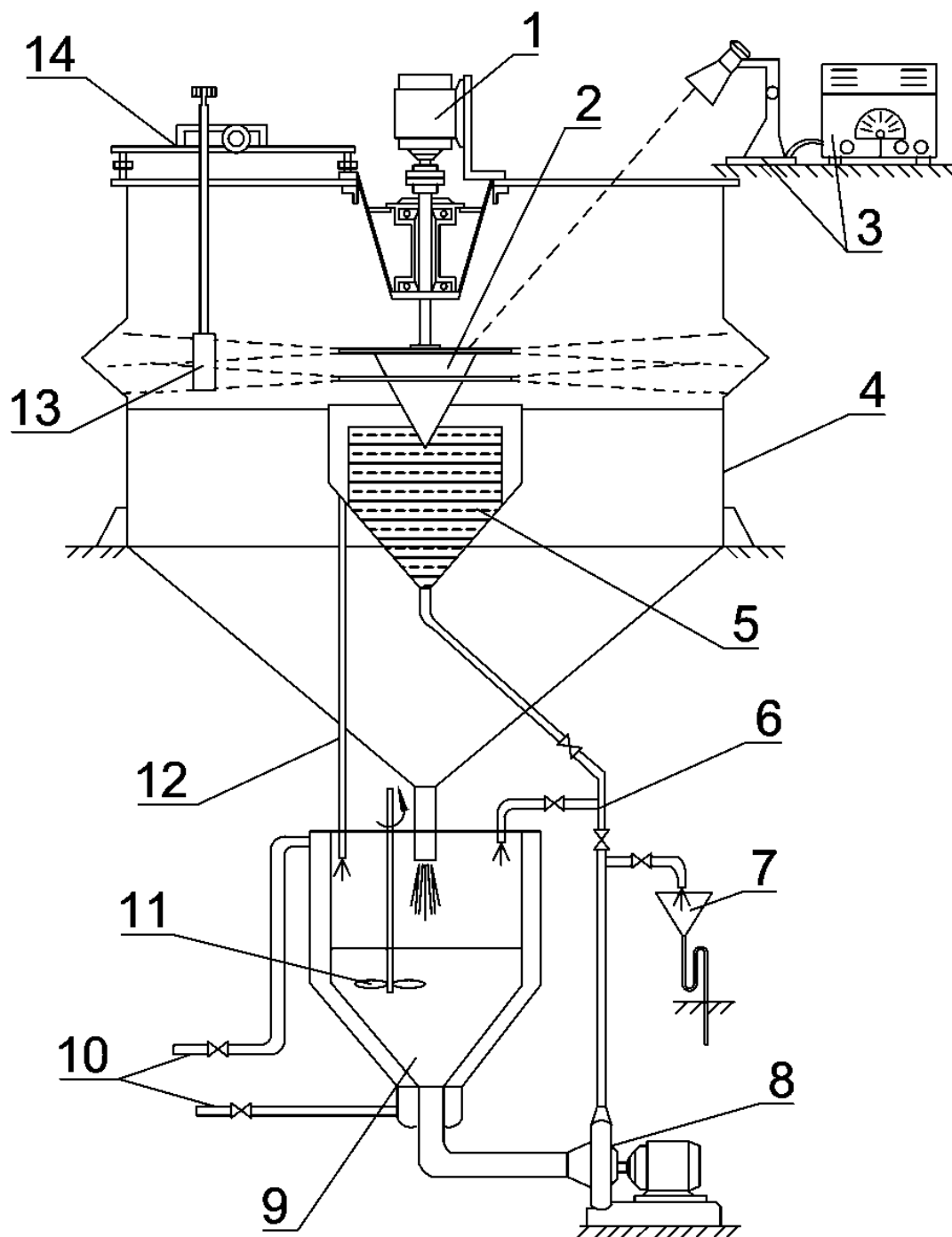


Рис. 1. Схема експериментального стенду по розпилю суспензії та води:

1 - електродвигун; 2 - дисковий розпилювач; 3 - стробоскопічний тахометр; 4 - циліндричний корпус з кільцевою камерою; 5 - чаша; 6 - трубопроводи; 7 - злив; 8 - насос; 9 - бак з водяною рубашкою; 10 - трубопроводи теплоносія; 11 - мішалка; 12 - циркуляційний трубопровід; 13 - пастка для крапель; 14 – координатник.

Дисковий розпилювач складався з декількох дисків різного діаметра (0,2; 0,3 та 0,4 м), що дозволило дослідити вплив геометрії на розподіл рідини. Вода подавалася на розпилювач у закритій циркуляційній системі з контролем температури, що забезпечувала сталі умови проведення експерименту.

У ході дослідження було встановлено, що рівномірний розподіл рідини по поверхні дисків залежить від форми та кількості отворів у конічній частині розпилювача [4]. При збільшенні кількості отворів зі збереженням периметра прохідного перерізу спостерігається покращення розподілу рідини по дисках (рис. 2). Оптимальна відстань між дисками становить 30 мм, що забезпечує рівномірне злиття плівки рідини та стабільне формування факела.

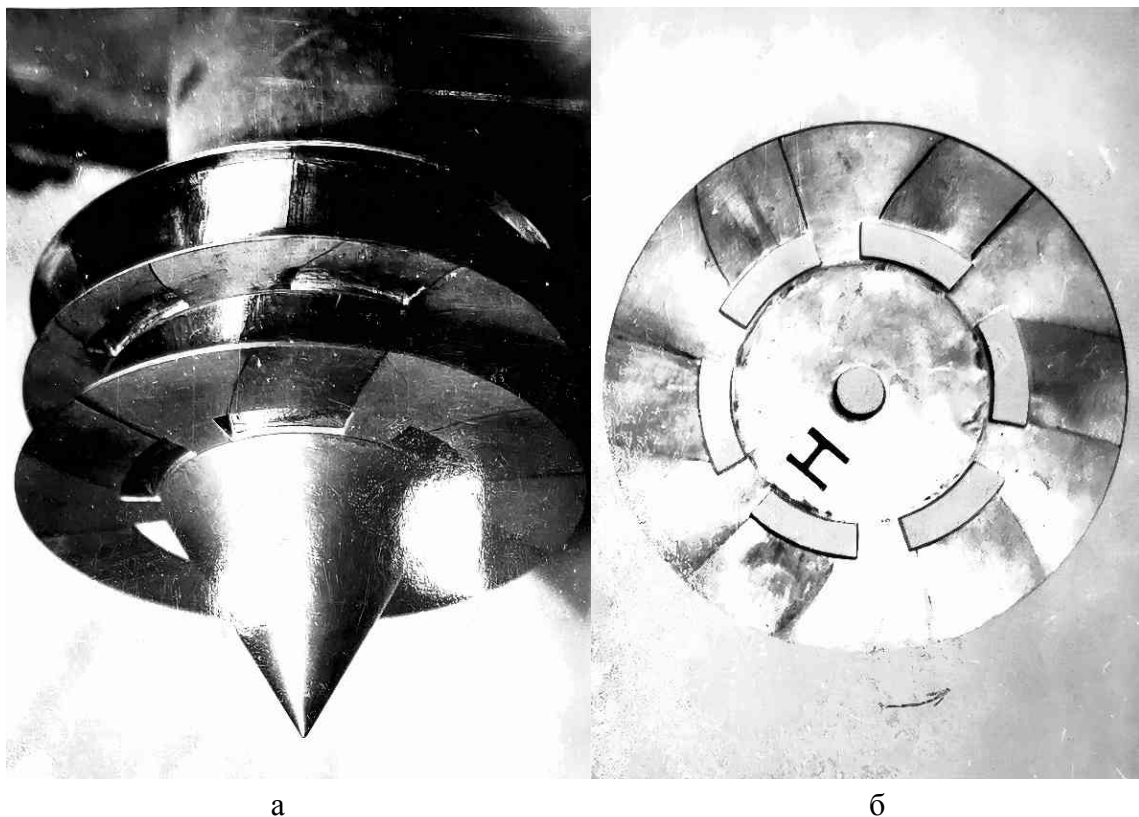


Рис. 2. Тридисковий водорозпилювач з конусною насадкою при куті розкриття конуса 60° , діаметрі дисків 0,3 м і обертанні за годинниковою стрілкою з кутовою швидкістю обертання $\omega=298 \text{ с}^{-1}$: а — загальний вид водорозпилювача; б — нижній диск водорозпилювача зі слідами руху водяної плівки по поверхні диску.

Згідно з результатами досліджень, найбільш ефективний розподіл досягається при співвідношенні периметрів отворів: $2/3$ довжини кола для нижнього диска, $1/2$ — для середнього. Для серійного виготовлення розпилювачів запропоновано конструкцію з 6 отворами в кожному диску, що дозволяє забезпечити повторюваність результатів та стабільну геометрію факела.

Геометричні характеристики факела розпилу та дисперсність крапель.

Формування стабільного факела розпилу є критично важливим для досягнення високої ефективності захоплення пилу в апаратах мокрого очищення. Дослідження проводились на лабораторному стенді з дисковим розпилювачем, оснащеним конусною насадкою. Для фіксації геометрії факела використовувався водопоглинаючий матеріал із нанесеною координатною сіткою, що дозволяло точно відстежувати контури крапельного факела за різних режимів роботи (рис. 3).

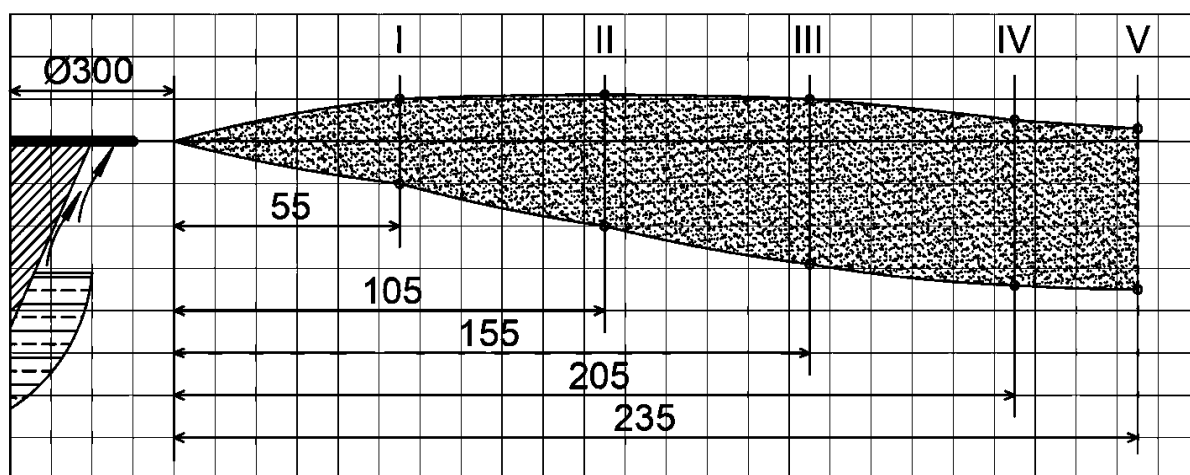


Рис. 3. Профіль факела розпилу води однодисковим розпилювачем з конусною насадкою за даними табл. 1.

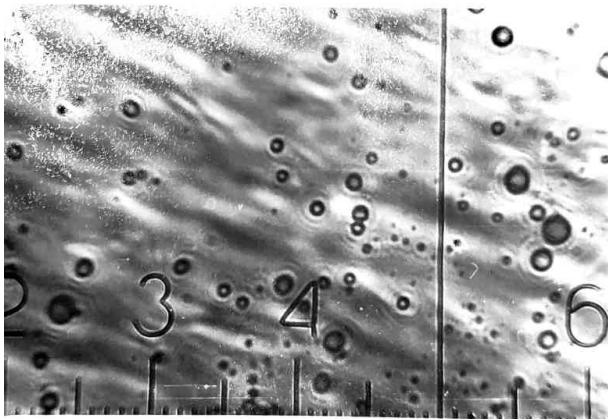
Вимірювання проводили в поперечних перерізах на відстані 0,055–0,235 м від краю диска, а висоту факела визначали за допомогою мікрометра. За результатами досліджень встановлено, що висота факела змінюється від 17 до 44 мм залежно від відстані від краю диска, що відображено в таблиці 1 [5]. При цьому кут розкриття факела зростає зі збільшенням кутової швидкості обертання розпилювача.

Результати свідчать, що форма факела та ступінь розпилу значною мірою залежать від конструктивних параметрів, зокрема діаметра диска, кількості отворів і швидкості обертання. Чим вище окружна швидкість диска, тим більш тонкодисперсний аерозоль формується, а факел розширюється, забезпечуючи кращу взаємодію крапель із частинками пилу.

Окрему увагу приділено впливу механічних домішок у рідині на якість розпилу. Для цього було застосовано метод уловлювання крапель в імерсійне середовище з подальшим мікрофотографуванням (рис. 4). Встановлено, що наявність твердих частинок у воді сприяє зменшенню середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель та утворенню більш дрібнодисперсного аерозолі.

Таблиця 1. Результати інструментальних вимірювань висоти факела розпилу дискового водорозпилювача з конусною насадкою (діаметр диска - 0,3 м, кутова швидкість обертання - $\omega=299$ рад/с, товщина диска - 0,0015 м, продуктивність водорозпилювача - 123,6 кг/год).

Найменування вимірюваної величини	Результати замірів				
	I	II	III	IV	V
Відстань від краю диска, м	0,055	0,105	0,155	0,205	0,235
Висота факелу розпилу над горизонтальною площиною диску, м	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-3}$	$11,0 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$13,0 \cdot 10^{-3}$	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-3}$	$11,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Загальна висота факелу розпилу, м	$17,0 \cdot 10^{-3}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$	$40,5 \cdot 10^{-3}$	$41,0 \cdot 10^{-3}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$
	$17,0 \cdot 10^{-3}$	$39,5 \cdot 10^{-3}$	$42,0 \cdot 10^{-3}$	$44,0 \cdot 10^{-3}$	$39,5 \cdot 10^{-3}$
	$17,0 \cdot 10^{-3}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$	$41,0 \cdot 10^{-3}$	$42,5 \cdot 10^{-3}$	$38,0 \cdot 10^{-3}$



а



б

Рис. 4. Мікрофотографії розпилу водопровідної води дисковим розпилювачем
а — водопровідна вода при $\theta=18$ °С (витрата води $W=0.18$ м³/год; $\omega R=23.6$ м/с);
б — водопровідна вода при $\theta=45$ °С (витрата води $W=0.14$ м³/год; $\omega R=31.4$ м/с).

Математичне моделювання диспергування рідини та умови експерименту. У рамках дослідження сформовано математичні моделі, які описують залежність середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель у факелі розпилу від ключових параметрів процесу: витрати рідини, температури, окружної швидкості диска та концентрації механічних домішок. Емпіричні

рівняння були отримані шляхом обробки даних понад 80 експериментів у різних режимах роботи установки [2]. Для суспензії з механічними домішками модель має вигляд рівняння:

$$\frac{d_{3,2}}{D_g} = 4.81 \left(\frac{D_g^2 \omega \rho_c}{\mu_c} \right)^{-0.47} \cdot \left(\frac{W_c \rho_c}{D_g \mu_c} \right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\sigma_c D_g \rho_c}{\mu_c^2} \right)^{-0.22} \cdot \left(\frac{C_T}{\rho_c} \right)^{0.05}, \quad (1)$$

Для водопровідної води рівняння має такий вигляд:

$$\frac{d_{3,2}}{D_g} = 0.38 \left(\frac{W_{жс}}{D_g^3 \omega} \right)^{0.12} \cdot \left(\frac{\sigma_{жс}}{D_g^3 \omega^2 \rho_{жс}} \right)^{0.26} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{D_g^2 \omega \rho_{жс}} \right)^{0.15}, \quad (2)$$

Динамічну в'язкість суспензії визначали за формулою Ейнштейна:

$$\mu_c = \mu_{жс} (1 + 2.5 \varphi) \quad (3)$$

де φ - об'ємна концентрація твердої фази в суспензії.

Густину визначено за формулою Кривошеєва:

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{\chi}{\rho_T} + \frac{1-\chi}{\rho_{жс}}} \quad (4)$$

де χ - масова частка твердої фази в суспензії; ρ_T , $\rho_{жс}$ — відповідно, густина твердої фази та рідини.

Поверхневий натяг вимірювали сталамометром. Такий підхід дозволив врахувати фізико-хімічні властивості рідини, які істотно впливають на дисперсність крапель [6].

Особливістю проведених експериментів є використання латинського куба як основи для плану дослідження, що дозволило суттєво зменшити кількість дослідів за збереження високої достовірності результатів. Концентрація твердих домішок змінювалась на дев'яти рівнях, тоді як інші змінні — на трьох.

Експериментальні дані підтвердили, що з підвищенням температури рідини або збільшенням вмісту частинок у зворотній воді діаметр крапель зменшується, підвищуючи загальну площу міжфазної поверхні факела. Така зміна є критичною для процесів тепло- і масообміну та, відповідно, для ефективного змочування частинок пилу у потоці.

Експериментальне дослідження ефективності пиловловлення. Для оцінки ефективності очищення запиленого повітря було змонтовано експериментальний стенд з пиловловлювачем циклонного типу, оснащеним дисковим водорозпилювачем (рис. 5). Система дозволяла створювати стабільний потік запиленого повітря із заданою температурою, вологістю та концентрацією пилу, забезпечуючи умови, максимально наближені до промислових.

Запилення потоку здійснювалося за допомогою ежекторного пилоутворювача, до якого стиснене повітря подавалося з компресора через дросельну шайбу. Для контролю параметрів потоку використовували мікроманометри, термopари, реометри, психрометри та інші прилади [7]. Температура води й повітря підтримувалась автоматичною системою регулювання, що дозволяло досліджувати тепломасообмінні процеси у стабільних умовах.

Методика визначення ефективності пиловловлення базувалася на порівнянні масової концентрації пилу на вході та виході з апарата. Початкова концентрація визначалася шляхом дозування маси пилу у вхідний потік та обліку витрати повітря, тоді як кінцева – шляхом відбору проб і зважування фільтрів після проходження повітря через пилозабірну трубку з електронагрівом (рис. 6, рис. 7).

Крім загального ступеня очищення, досліджувався також пофракційний ступінь пиловловлення, що визначався за допомогою мікроскопії осаджених частинок на фільтрах. Аналіз частинок дозволяв встановити, які фракції пилу вловлюються найкраще, і як це пов'язано з дисперсністю факела та характеристиками крапель.

Оптимізація режиму роботи пиловловлювача. З метою підвищення ефективності очищення газоподібних викидів і зменшення гідравлічного опору установки проведено серію експериментів для визначення оптимальних режимних параметрів роботи пиловловлювача з дисковим розпилювачем. Пошук екстремуму здійснювався за допомогою активного планування експерименту з побудовою моделі другого порядку [8].

Оптимізація передбачала одночасне мінімізацію кінцевої запиленості повітря після очищення та зниження гідравлічного опору апарата. У дослідженнях використовувалися такі керовані фактори: температура запиленого потоку (X_1), дисперсність пилу (X_2), діаметр дисків (X_3), кількість дисків (X_4), швидкість газу на вході (X_5), температура розпилюваної води (X_6). Початкова запиленість (X_7) вважалася некерованим параметром.

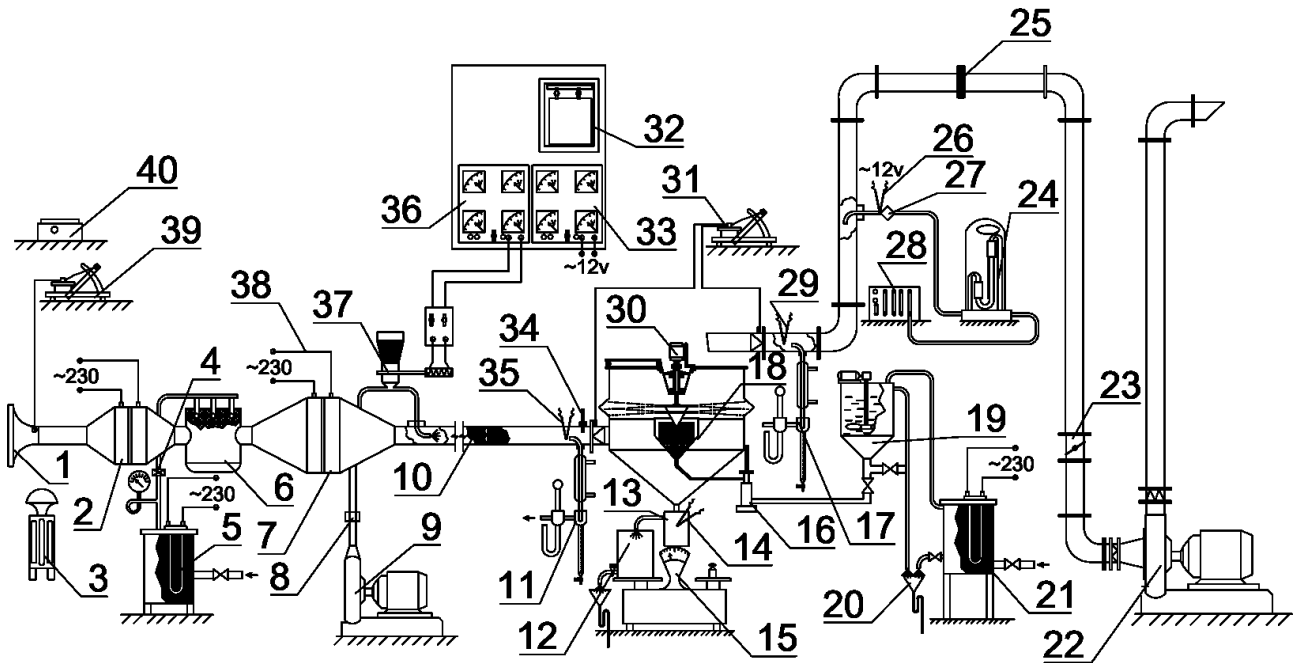


Рис. 5. Схема експериментального стенду

1 – вимірювальний колектор; 2 – електропідігрівач (електрокалорифер); 3 – аспіраційний психрометр; 4 – вимірювальна діафрагма пари; 5 – електрокотел для генерації пари; 6 – змішувальна камера; 7 – додатковий електропідігрівач; 8 – дросельна шайба; 9 – компресор; 10 – стабілізуючі сітки; 11 – пристрій для визначення вологості (вхідний); 12 – мірна посудина; 13 – трубопровід зливу суспензії; 14 – термопара (хромель-краплинна); 15 – технічні терези; 16 – клапан подавання суспензії; 17 – пристрій для визначення вологості (вихідний); 18 – термопара вбудована в апарат; 19 – бак з мішалкою для приготування суспензії; 20 – викид в каналізацію; 21 – електрокотел для нагріву води; 22 – відцентровий вентилятор; 23 – дросель клапан; 24 – реометр Т-80; 25 – вимірювальна діафрагма (на виході); 26 – термопара; 27 – камера стабілізації потоку; 28 – ротаційна установка ПРУ-4; 29 – термопара; 30 – пиловловлювач циклонного типу з дисковим розпилювачем; 31 – мікроманометр ММН; 32 – самописний потенціометр ЕПП-09М; 33 – шкала з вольтами; 34 – технічний отвір для взяття проб; 35 – термопара; 36 – шкала для контролю подачі пилу; 37 – пилоутворювач ежекторного типу; 38 – регулятор температури (потужності калорифера); 39 – мікроманометр ММН; 40 – барометр.

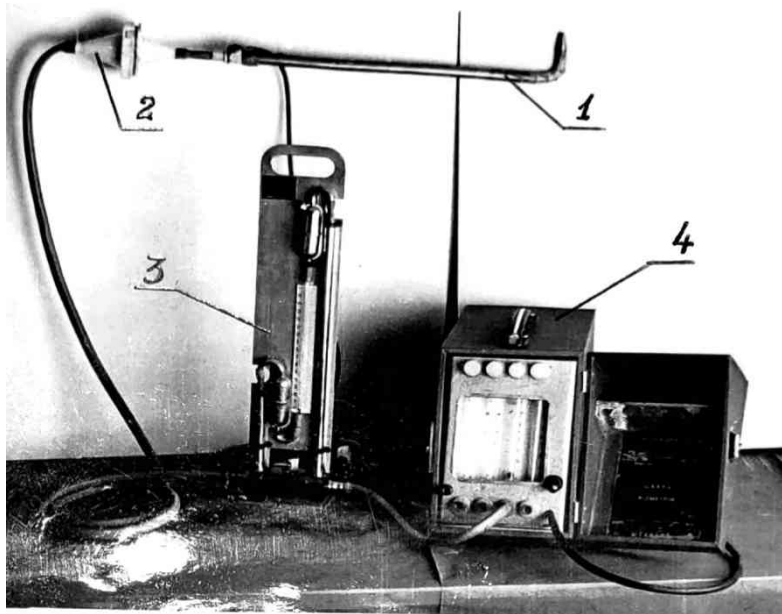


Рис. 6. Установка для відбору пилових проб
1 — пилозабірна трубка з електрообігрівом;
2 — патрон для фільтрів АФА-В-18;
3 — реометр;
4 — переносна ротаційна установка типу ПРУ-4.

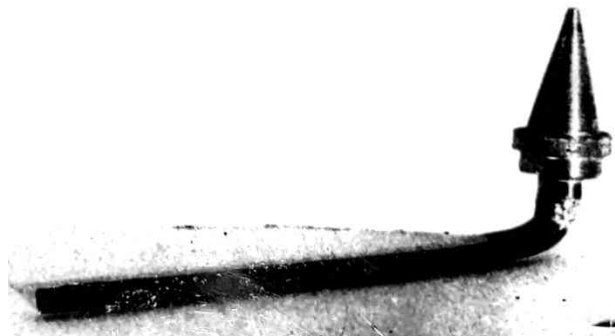


Рис. 7. Пилозабірна трубка з внутрішньою фільтрацією.

Застосовано план Хартлі, що дозволив суттєво зменшити кількість експериментів (до 29 дослідів) без втрати статистичної значущості результатів [9]. Математичні моделі побудовані у вигляді поліномів другого порядку для двох вихідних параметрів: кінцевої концентрації пилу (y_1) та гідравлічного опору (y_2), набувають вигляду:

а) для кінцевої запиленості

$$y_1 = -216.5 - 0.64 \cdot x_1 - 0.56 \cdot x_2 + 4.93 \cdot x_3 + 19.05 \cdot x_4 - 0.67 \cdot x_5 - 3.35 \cdot x_6 + 0.002 \cdot x_{12} - \\ - 0.17 \cdot x_{22} - 0.02 \cdot x_{32} - 3.97 \cdot x_{42} + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.03 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.009 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_6 + \\ + 0.04 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.26 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.15 \cdot x_2 \cdot x_5 + 0.03 \cdot x_2 \cdot x_6 - 0.24 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.02 \cdot x_3 \cdot x_6 + \\ + 1.96 \cdot x_4 \cdot x_5 - 0.06 \cdot x_5 \cdot x_6; \quad (5)$$

б) для гідравлічного опору

$$y_2 = 514.66 + 0.24 \cdot x_1 + 2.62 \cdot x_2 - 4.84 \cdot x_3 - 17.23 \cdot x_4 - 8.90 \cdot x_5 - 0.18 \cdot x_6 - 0.09 \cdot x_2 + \\ + 0.01 \cdot x_{32} + 0.11 \cdot x_{52} - 0.11 \cdot x_{52} - 0.01 \cdot x_{62} - 0.02 \cdot x_1 \cdot x_5 - 0.13 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.03 \cdot x_2 \cdot x_5 + \\ + 0.05 \cdot x_3 \cdot x_5 + 0.003 \cdot x_3 \cdot x_6 + 0.88 \cdot x_4 \cdot x_6 - 0.01 \cdot x_1 \cdot x_4; \quad (6)$$

Значущість моделей підтверджено критерієм Фішера ($F_{y1}=16.8$, $F_{y2}=262.0$), що свідчить про адекватність опису процесу в межах варіації параметрів. Моделі продемонстрували нелінійний характер залежностей і наявність взаємодій між факторами, що підтверджує складність фізико-хімічного процесу очищення.

Проведено аналіз регресійних коефіцієнтів, який показав, що найбільший вплив на ефективність має діаметр дисків та температура запиленого газу. В рамках розв'язання компромісної задачі знайдено оптимальні значення параметрів, що забезпечують кінцеву запиленість ≤ 60 мг/м³ при $Z_H = 1000$ мг/м³ та мінімальний гідравлічний опір у межах 98–108 Па.

Вплив вологості запиленого потоку на ефективність пиловловлення. Особливу увагу в ході експериментальних досліджень приділено аналізу впливу вологості запиленого газового потоку на загальну ефективність очищення. Відомо, що конденсація водяної пари на поверхні частинок пилу сприяє їх зростанню в масі та розмірах, що покращує умови осадження у крапельному середовищі [10].

Досліди проводились на стенді з регульованим зволоженням повітря шляхом введення водяної пари в камеру змішування (рис. 1) [11]. Вологовміст змінювався в межах 10–60 г/кг сухого повітря, температура повітря – від 92 до 140 °С. У якості модельних пилів використовували кварцовий пил із поганою змочуваністю ($b_{50} = 10$ і 17 мкм) та добре змочуваний доломітовий пил ($b_{50} = 20$ мкм).

Отримані результати свідчать, що зі зростанням вмісту водяної пари у газі ефективність очищення істотно підвищується. Графіки залежності ступеня очищення від вологовмісту повітря (рис. 8) демонструють нелінійний характер покращення ефективності, особливо для частинок дрібного діаметра [12].

Було встановлено, що конденсація пари на поверхні крапель і пилових частинок призводить до збільшення маси агрегатів, що покращує їх захоплення у факелі розпилу. Такий механізм особливо ефективний при очищенні гарячих викидів, коли вологість і температура газу досягають критичних значень для переходу вологи в рідку фазу [13].

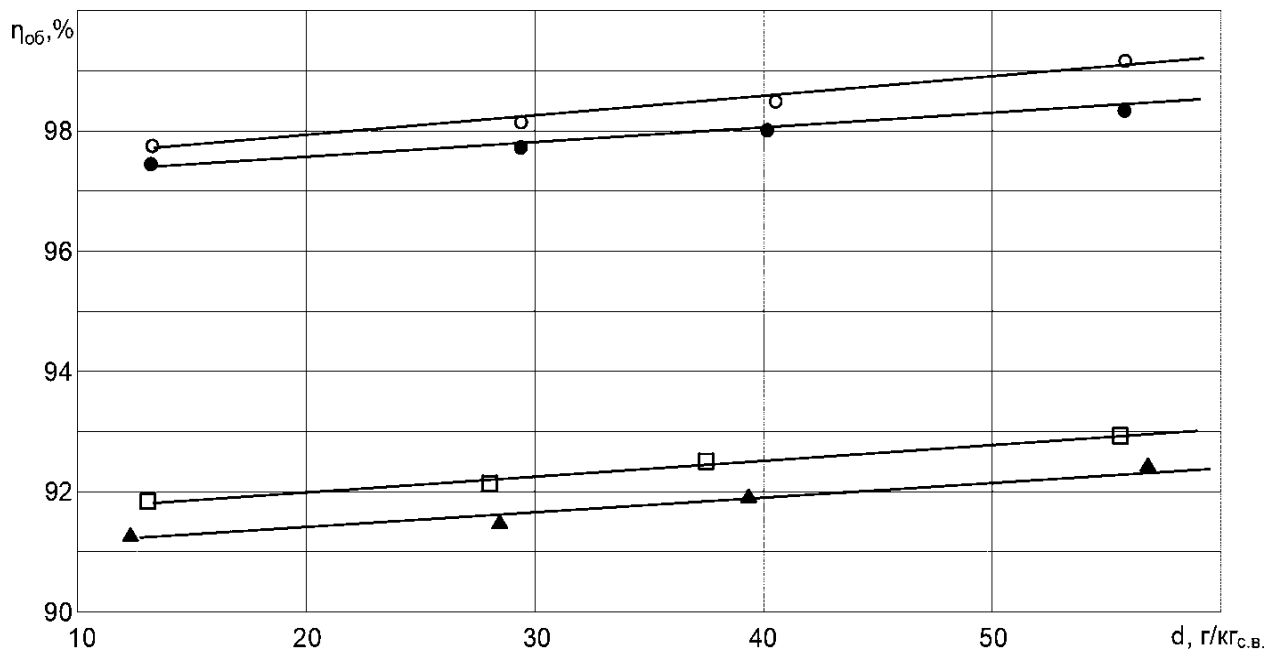


Рис. 8. Залежність ефективності пилоловлення від вологовмісту в запиленому потоці:

- - доломіт з $b_{50}=20$ мкм, $t_v=92$ °C, $Z_{поч}=1950$ мг/нм³;
- - доломіт з $b_{50}=20$ мкм, $t_v=140$ °C, $Z_{поч}=2020$ мг/нм³;
- - кварцевий пил з $b_{50}=17$ мкм, $t_v=93$ °C, $Z_{поч}=1230$ мг/нм³;
- - кварцевий пил з $b_{50}=17$ мкм, $t_v=130$ °C, $Z_{поч}=1280$ мг/нм³.

Таким чином, контроль вологості запиленого повітря є важливим регулюючим фактором у роботі пилоловлювачів мокрого типу, а його оптимізація може забезпечити додаткове підвищення ефективності без суттєвого ускладнення конструкції апарата.

Висновки. Результати проведених досліджень підтвердили, що конструктивні параметри дискового водорозпилювача, зокрема діаметр дисків, кількість і розміщення отворів, а також швидкість їх обертання мають визначальний вплив на геометрію факела розпилу та дисперсність крапель, що формуються. Оптимальні значення цих параметрів забезпечують формування рівномірного тонкодисперсного факела, що підвищує ефективність захоплення частинок пилу з повітряного потоку.

Встановлено, що застосування води з твердими домішками (зворотної води) може сприяти зменшенню середнього діаметра крапель і підвищенню ефективності пилоловлення, за рахунок збільшення загальної площі міжфазного контакту. Така взаємодія має практичну цінність з точки зору повторного використання води у замкнених циклах очищення.

Математичні моделі, отримані в ході дослідження, дають змогу оцінювати середній розмір крапель і ступінь очищення в залежності від експлуатаційних параметрів, що дозволяє їх використовувати для проєктування та оптимізації

роботи промислових пиловловлювачів.

Оптимізація режиму роботи апарата за допомогою методу активного експерименту дозволила визначити умови, за яких досягається високий ступінь очищення (до 96–98%) при низькому гідравлічному опорі (близько 100 Па), що свідчить про потенціал ефективного промислового використання таких систем у складних теплотехнологічних умовах.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно зосередити на масштабуванні результатів для промислових умов та вивченні довготривалої стабільності роботи пиловловлювачів з дисковими розпилювачами при використанні зворотної води зі змінним вмістом домішок. Перспективним є розширення експериментальної бази для різних типів пилу, зокрема токсичних та волокнистих частинок, що потребують особливих умов зволоження та осадження.

Також актуальним є дослідження взаємодії диспергованої рідини з турбулентним потоком у динамічних апаратах складної геометрії [14]. Впровадження інтелектуальних систем керування параметрами розпилення в режимі реального часу відкриває можливості для підвищення надійності та енергоефективності очищення.

Окремим напрямом є інтеграція отриманих моделей у цифрові платформи для проектування аспіраційних систем, що дозволить інженерам оперативно підбирати конфігурації обладнання залежно від технологічних вимог та умов виробництва.

References

1. Liubarets, O. P., Mykytenko, M. R. “Analiz faktoriv, shcho vplyvaiut na stan znepylennia aspiratsiinykh vykydiv”. Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplofazopostachannia: Naukovo-tekhnicnyi zbirnyk, Iss. 46, 2023, pp 89-108. (in Ukrainian)
2. Mykytenko M. R. “Matematyчне modeliuвання ta analiz efektyvnosti rukhu chastynok u tsyklonnykh rozpyliuvalnykh aparatakh”. Prostorovy rozvytok, Iss. 11, 2025, pp. 456-463. (in Ukrainian)
3. Ratushniak H.S., Lialiuk O.H. Zasoby ochyshchennia hazovykh vykydiv. IVNVKP «Ukrheliotekh», 2009. (in Ukrainian)
4. Zynych P. L. Ventyliatsiia hromadskykh budivel, 2002. (in Ukrainian)
5. Hadzhyiev E.N., Varlamov Ye.M. Dyspersiinyi analiz pylu v systemakh aspiratsii pid chas vyrobnytstva teploizoliatsiinykh materialiv iz zastosuvanniam udoskonalenoї eksperymentalnoi ustanovky, Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut

ekologichnykh problem, Kharkiv, 2017. (in Ukrainian)

6. Sager T.M. et al. Improved method to disperse nanoparticles for in vitro and in vivo investigation of toxicity. *Nanotoxicology*. 2007. V. 1. №. 2. P. 118–129.

7. Fang Xueming, Jiang Bingyou, Yuan Liang, Liang Yuxiang, Ren Bo, Tao Wenhan, Li Xianbao. “Experimental Study on Atomization Characteristics of Gas–Liquid Two-Phase Flow Nozzle and Its Dust Removal Effect”. Key Laboratory of Industrial Dust Control and Occupational Health, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China, 2022.

8. Sheliukh Yu. Ye. “Doslidzhennia vplyvu hidravlichnoho oporu na produktyv-nist roboty vykhrovykh pylovlovliuvachiv novoho pokolinnia”. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, Iss. 13, pp. 137-143, 2016. (in Ukrainian)

9. Tysovskiy L. O., Dorundiak L. M., Liashenyk A. V., Dadak Yu. R. “Pobudova matematychnoi modeli dlia zadachi pro rukh povitria v tsykloni”. *Vseukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal PHiP*, 2010, Iss. 2 (28), pp. 57-62.

10. Ziniak, V. V., Tkachuk, A. Ya. “Tekhnolohiia ochyshchennia pylu v mokrykh skrubbe-rakh”. *Tekhnolohichni rozvytok ventylyatsiinykh system*, Iss. 13, pp. 145–151, 2001. (in Ukrainian)

11. Spinov V. M., Aftaniuk V. V. “Eksperymentalne doslidzhennia kinetyky mokroho pylovlovliuvacha. Enerhozberezhennia. Enerhetyka”. *Enerhoaudyt, Natsionalnyi tekhnichniy universytet «Kharkivskyi politekhnichniy instytut» № 2 (84)*, pp. 32-46, 2011. (in Ukrainian)

12. Aftaniuk V. V., Kiris O. V., Danylenko D. V., Aftaniuk A. V. “Rozrobka intehrovanoi konstruktsii skrubera dlia sudnovykh enerhetychnykh ustanovok”. *Sud-novi enerhetychni ustanovky: naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. Iss. 45, Odesa: NU «OMA», 2022, 201 p. (in Ukrainian)

13. Liashenyk A. V., Tysovskiy L. O., Dorundiak L. M., Dadak Yu. R. “Obgruntuvannia konstruktsii tsyklona dlia ochyshchennia povitria na pidpriemstvakh derevoobrobnoi haluzi”. *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiia: zb. nauk. prats. Kharkiv: Vyd-vo Uk-rNDILHA*, Iss. 21-09. pp. 119-125, 2011. (in Ukrainian)

14. N. Maksuita, Yu. Golik. “Comparative analysis of pollution of atmospheric air in Cities (an Example of Leipzig and Poltava)”. *Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering*, 2019. P. 260-267.

UDC 622.741.3.022;622.7;620.133

PhD, Assoc. Prof. **Oleksandr Liubarets**,

liubarets.op@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1905-9283,

Master **Maksym Mykytenko**,

mykytenko_mr@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2891-6136,

Kyiv National University of Construction and Architecture

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN OF THE DISC SPRAYER ON THE EFFICIENCY OF DUST COLLECTION IN HIGH- TEMPERATURE FLOWS

Abstract. *This article presents the results of experimental research on the purification of high-temperature aspiration emissions using a cyclone-type dust collector equipped with a disk liquid atomizer. The focus is placed on studying the influence of structural parameters of the atomizer, the physicochemical properties of the working liquid, and flow conditions on the geometric characteristics of the spray plume, droplet dispersion, and dust removal efficiency. The formation of a stable and uniform spray cone is a key factor in enhancing gas-liquid interaction and increasing the capture probability of fine and coarse dust particles.*

Measurements were carried out on a laboratory setup using a coordinate grid and absorbent surface to visualize droplet trajectories and spray shapes under various operating modes. The analysis included determining the plume height and cross-sectional expansion at different distances from the disk edge. The influence of variables such as disk diameter, number and shape of nozzle holes, rotational speed, gas temperature, humidity, and the presence of solid impurities in the recirculated liquid was evaluated.

The study revealed that using contaminated water containing solid particles (e.g., quartz) significantly enhances the fineness of the atomized spray due to the reduction in droplet size, resulting in greater interfacial surface area. Mathematical models were developed to describe the relationship between operational parameters and the efficiency of the dust collection process. Optimization experiments demonstrated that a capture efficiency of up to 96–98% can be achieved while maintaining hydraulic resistance below 100 Pa, indicating the potential for efficient application of such systems in industrial high-temperature environments. The findings contribute to the development of resource-efficient, adaptable wet cleaning technologies for air pollution control in modern manufacturing facilities.

Keywords: disk sprayer; aspiration emissions; dust collection; spray plume; droplet dispersion; liquid recirculation; hydraulic resistance

УДК 692.82

професор **Георгій Ратушняк**,
ratusnag@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9656-5150,

аспірант **Андрій Лялюк**,
1b16blyalyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4803-1629

Вінницький національний технічний університет

ЕКСПЕРТНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ ТА ЛІНГВІСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ

***Анотація.** Відповідно до енергетичної стратегії Європейського союзу планується суттєве впровадження інноваційних технологій декарбонізації шляхом реалізації енергоефективних технологій забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщеннях будівель. Вирішенню цієї проблеми присвячена відповідна законодавча база України стосовно підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель.*

Розвиток інструментарію прогнозування енергоефективності зовнішніх огороджувальних конструкцій будівель протягом їхнього життєвого циклу потребує оцінки впливу визначальних параметрів, які характеризуються кількісними та якісними значеннями. Визначення значень цих параметрів експериментальним шляхом дороговартісне та в багатьох випадках неможливе з заданою достовірністю. Як джерело необхідної інформації доцільно використовувати експертні оцінки впливу визначальних параметрів на прогнозовану енергоефективність теплоізоляційної оболонки будівель.

Для розроблення складової експертно-моделювальної системи інтелектуальної підтримки прийняття організаційно-технологічних рішень щодо підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель використано математичний апарат нечіткої логіки, а саме метод побудови системи нечітких логічних рівнянь, які характеризують ступінь належності довільного елемента універсальних множин до нечіткої множини. Метод базується на розподілу ступеня належності універсальної множини, на якій задається нечітка множина, відповідно до їх рангів. Ступені належності параметрів до нечіткої множини, яка означена відповідним термом, обчислено за відомими формулами, шляхом складання відповідних матриць. Нечіткі множини для різних лінгвістичних змінних визначальних параметрів впливу на прогнозовану енергоефективність огороджувальних конструкцій будівель представлено у вигляді відповідних нечітких логічних рівнянь. Ці рівняння характеризують поверхню належності лінгвістичних змінних за відповідним термом на цільову функцію, а саме витрати енергії на капітальне будівництво або реконструкцію, на експлуатацію та рециклінг.

***Ключові слова:** енергоефективність, експертна оцінка, моделювання, лінгвістичні змінні, логічні рівняння, нечіткі множини, огороджувальні конструкції, теплоізоляційна оболонка.*

Вступ. Енергетична стратегія Європейського союзу передбачає впровадження енергоефективних технологій декарбонізації при спорудженні нових та реконструкції наявних будівель та інженерних мереж із забезпеченням оптимальних параметрів мікроклімату в приміщеннях будівель. Системи створення мікроклімату в приміщеннях будівель споживають 30-40% енергетичних ресурсів України від загальної кількості. Тому закономірним є реалізація чинного законодавства України стосовно підвищення енергоефективності в будівельній галузі та житлово-комунальному господарстві [1]. Ця політика триває протягом усього часу незалежності України, про що свідчить попередній закон [2]. Управління організаційно-технологічними чинниками з підвищення енергоефективності будівель ґрунтується на використанні інструментарію інтелектуального підтримання прийняття відповідних інноваційних управлінських рішень з реалізації енергоефективних заходів на всіх етапах життєвого циклу будівель [3,4]. Реалізація проєктів передбачає підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель як їх теплоізоляційної оболонки [5,6].

Актуальність роботи. Підвищення енергетичної ефективності формування мікроклімату є актуальною задачею, що дозволяє посилити енергетичну незалежність, знизити витрати коштів енергоресурси та зменшити негативний вплив будівельної галузі на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні шляхи вирішення проблеми оцінювання та прогнозування енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель висвітлено в дослідженнях вітчизняних та закордонних публікаціях [7-21].

Аналіз впливу визначальних чинників на прогнозовану надійність огорожувальних конструкцій будівель висвітлено у роботі [7]. Вказано на необхідність вдосконалення математичного інструментарію для визначення оптимальних енергоефективних рішень при влаштуванні та експлуатації огорожувальних конструкцій будівель.

У роботі [8] наведено аналіз іноземного та вітчизняного досвіду досліджень наукового обґрунтування пріоритетів поліпшення інструментарію енергетичного моделювання. Підкреслено, що моделі оцінювання енергетичної ефективності повинні бути достатньо гнучкими за структурою та дозволяти формалізувати оперативно змінювання вхідної інформації та показники ефективності прийнятих рішень і критеріїв їхньої оцінки.

У роботі [9] підкреслено, що недостатньо розповсюдженим підходом до оцінки енергетичної ефективності будівель в Україні є динамічне енергетичне моделювання з використанням системного аналізу. При цьому доцільно використовувати відомі програмні комплекси, що дозволяють суттєво скоротити

затрати часу на створення енергетичних моделей.

У статті [10] рекомендується на початковій стадії проєктування, коли визначаються прогнозовані параметри енергетичних характеристик будівель, використовувати програмний продукт Revit. Використання цього програмного продукту дозволяє прогнозувати проєктну енергетичну ефективність огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням змінних теплотехнічних характеристик матеріалів та технологічних процесів.

У роботі [11] наведено аналіз методів встановлення «стандарту» енергоспоживання. Підкреслено доцільність побудови багатофакторних математичних моделей енергоспоживання.

У роботі [12] розглянуто методи прогнозування в енергоефективності та архітектурі. Підкреслено сильні та слабкі сторони таких методів як цільове прогнозування та екстраполяційний. Для формування прогнозованої моделі енергоспоживання доцільно застосовувати морфологічний аналіз виявлення факторів впливу на цільову функцію на засадах формалізації об'єкта та побудови формалізованих математичних моделей та дослідження адекватності результатів моделювання.

Дослідженнями [13] щодо оцінювання експлуатаційних показників і довговічності конструкцій фасадної теплоізоляції будівель виявлено необхідність розроблення математичного інструментарію з прогнозування стану огорожувальних конструкцій. Запропоновано вдосконалену математичну модель та алгоритм розрахунку температурно-вологісного режиму конструкцій фасадної теплоізоляції з метою підвищення її енергоефективності.

У монографії [14] запропоновано методику оцінювання надійності забезпечення ефективності теплоізоляційних будівельних виробів, які можуть використовуватися при влаштуванні огорожувальних конструкцій. Наведено результати числового моделювання з використанням відомих методів багатокритеріального аналізу для визначення потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

У роботі [15] розглянуто BIM-технології організаційно-технологічного підходу стосовно інформаційного моделювання в будівельній галузі. Підкреслено доцільність визначення енергоефективності та енергоспоживання будівель під час різних етапів життєвого циклу будівельного об'єкту. Визначено, що база даних про об'єкти, яка створена за допомогою BIM-технологій, є вихідною інформацією для прогнозування експлуатаційної надійності, управління проєктами проєктування та експлуатації будівель.

У роботі [16] для визначення енергетичної ефективності будівель як її властивості забезпечувати необхідною кількістю енергії для створення оптимальних мікрокліматичних умов у приміщеннях будівель рекомендовано

враховувати сумарні затрати енергії на влаштування огорожувальних конструкцій, експлуатацію, реконструкцію та утилізацію з можливістю рециклінга матеріалів. Запропоновано ієрархічний зв'язок визначальних параметрів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. Вказано, що визначальні параметри впливу характеризуються кількісними та якісними величинами, які можуть бути охарактеризовані лінгвістичними змінними.

Таким чином, аналіз літературних джерел, в яких висвітлено результати дослідження впливу визначальних параметрів на прогнозовану енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель, зокрема з використанням сучасних методів математичного моделювання, свідчить про відсутність вичерпних системних досліджень з вирішення проблеми пошуку математичного інструментарію з оцінювання енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель.

Таким чином, екскурс розвитку науково-методичних основ з моделювання методів інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень за результатами прогнозування енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель дозволив сформулювати мету та задачі досліджень.

Метою цього дослідження є розроблення елементів математичної моделі інтелектуального підтримання прийняття організаційно-технологічних рішень підвищення прогнозованої енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням функції належності нечітких оцінок впливу визначальних параметрів на цільову функцію. Для цього необхідно вирішити такі задачі:

1. Адаптувати математичний апарат нечіткої логіки та лінгвістичних змінних стосовно методології побудови функцій належності нечітких множин різних лінгвістичних змінних, які визначають витрати енергії на капітальне будівництво або реконструкцію, експлуатацію та рециклінг складових огорожувальних конструкцій будівель протягом їхнього життєвого циклу;
2. Нечіткі множини для різних лінгвістичних змінних визначальних параметрів впливу на прогнозовану енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель відобразити графічно у вигляді системи нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності лінгвістичних змінних за відповідним термом.

Основна частина. Реалізація заходів із забезпечення нормативних вимог стосовно енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель передбачає вдосконалення методів математичного моделювання їхніх теплозахисних властивостей та енергетичних витрат протягом їхнього життєвого циклу. Запропонована модель мінімізації сумарних витрат на

влаштування енергоефективних огорожувальних конструкцій, експлуатацію, реконструкцію та утилізацію з можливістю рециклінга матеріалів [16]

$$\Sigma E = E_B + E_E + E_P \rightarrow \min \quad (1)$$

де ΣE – сумарні витрати енергії за весь життєвий цикл огорожувальних конструкцій будівель; E_B , E_E , E_P – відповідно затрати енергії на будівництво, експлуатацію та рециклінг матеріалів.

На енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель за весь період їхнього життєвого циклу впливають кількісні та якісні фактори. При моделюванні з метою визначення прогнозованих витрат сумарної енергії на забезпечення їх функціонування рекомендується використовувати метод нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [5,14,16,21]. Модель об'єкта задається нечіткою базою знань, яка складається із сукупності правил, що поєднують лінгвістичні оцінки вхідних і вихідних змінних, які впливають на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель.

Сумарні витрати енергії за весь життєвий цикл на забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель відповідно до досліджень [21] на системному рівні як лінгвістичну змінну (ΣE) можна описати у вигляді співвідношення

$$\Sigma E = f(X_1, X_2, X_3) \quad (2)$$

де X_1 – лінгвістична змінна (ЛЗ), що характеризує витрати енергії на капітальне будівництво або реконструкцію, X_2 – лінгвістична змінна, що визначає витрати енергії на експлуатацію, X_3 – лінгвістична змінна, що визначає витрати енергії на рециклінг.

Параметри впливу на прийняття рішень при обґрунтуванні енергетичної ефективності огорожувальних конструкцій будівель (X_1 , X_2 , X_3) оцінюються нечіткими термами як лінгвістичними змінними. Для побудови нечіткої матриці знань про співвідношення між енергетичною ефективністю огорожувальних конструкцій будівель та визначальними параметрами впливу прийнято такі кількісні вирази: «низька» (Н), «нижче середньої» (НС), «середня» (С), «вище середньої» (ВС) та «висока» (В). Правила виконання нечітких логічних операцій виконано з використанням узагальненого елемента нечіткого логічного висновку між лінгвістичними змінними. Нечіткі висновки апроксимації залежності $\Sigma E = f(X, Y, Z)$ здійснено за допомогою нечітких правил «ЯКЩО-ТО» [табл.] [4,16,21,22].

Таблиця. Нечітка матриця знань про співвідношення між енергоефективністю огорожувальних конструкцій будівель та визначальними параметрами впливу як лінгвістичними змінними на системному рівні

ЯКЩО			ТО
Вплив витрат енергії на капітальне будівництво або реконструкцію (X)	Вплив витрат енергії на експлуатацію (X_2)	Вплив витрат енергії на рециклінг матеріалів (X_3)	Енергоефективність огорожувальних конструкцій (ΣE)
низький (Н)	низький (Н)	низький (Н)	низький (Н)
нижче середньої (НС)	низький (Н)	низький (Н)	
низький (Н)	нижче середньої (НС)	низький (Н)	
низький (Н)	низький (Н)	нижче середньої (НС)	
низький (Н)	нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)
нижче середньої (НС)	низький (Н)	нижче середньої (НС)	
нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	низький (Н)	
нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	
середній (С)	середній (С)	середній (С)	середній (С)
нижче середньої (НС)	середній (С)	середній (С)	
середній (С)	нижче середньої (НС)	середній (С)	
середній (С)	середній (С)	нижче середньої (НС)	

Продовження таблиці

ЯКЩО			ТО
вище середньої (BC)	вище середньої (BC)	середній (C)	вище середньої (BC)
вище середньої (BC)	середній (C)	вище середньої (BC)	
середній (C)	вище середньої (BC)	вище середньої (BC)	
вище середньої (BC)	вище середньої (BC)	вище середньої (BC)	
високий (B)	високий (B)	вище середньої (BC)	високий (B)
високий (B)	вище середньої (BC)	високий (B)	
високий (B)	вище середньої (BC)	вище середньої (BC)	
високий (B)	високий (B)	високий (B)	

Лінгвістичні висловлювання про співвідношення між енергетичною ефективністю огорожувальних конструкцій будівель та визначальними чинниками впливу (табл.) є підґрунтям для складання системи нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідним термом.

$$\begin{aligned} \mu_n(\sum E) = & \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \\ & \vee \mu_{nc}(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \\ & \mu_{nc}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \vee \mu_{nc}(x_3). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nc}(\sum E) = & \mu_n(x_1) \wedge \mu_{nc}(x_2) \wedge \mu_{nc}(x_3) \vee \mu_{nc}(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_{nc}(x_3) \vee \mu_{nc}(x_1) \wedge \mu_{nc}(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{nc}(x_1) \wedge \mu_{nc}(x_2) \wedge \mu_{nc}(x_3) \vee \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(\sum E) = & \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_{nc}(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \\ & \mu_{nc}(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_{nc}(x_3). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu_{ec}(\sum E) = & \mu_{ec}(x_1) \wedge \mu_{ec}(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \\ & \mu_{ec}(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_{ec}(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \\ & \mu_{ec}(x_2) \wedge \mu_{ec}(x_3) \vee \mu_{ec}(x_1) \wedge \mu_{ec}(x_2) \wedge \mu_{ec}(x_3). \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu_e(\sum E) = & \mu_e(x_1) \wedge \mu_e(x_2) \wedge \mu_{ec}(x_3) \vee \mu_e(x_1) \wedge \mu_{ec}(x_2) \wedge \\ & \mu_e(x_3) \vee \mu_e(x_1) \wedge \mu_{ec}(x_2) \wedge \mu_{ec}(x_3) \vee \\ & \vee \mu_e(x_1) \wedge \mu_e(x_2) \wedge \mu_e(x_3). \end{aligned} \quad (7)$$

Отримані нечіткі логічні рівняння на відповідному ієрархічному рівні (3-7) дозволяють виявити функції належності вхідних і вихідних змінних та побудувати аналітичні моделі функцій належності параметрів впливу на енергетичну ефективність огорожувальних конструкцій будівель.

Висновки. Запропонований інструментарій експертного оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель нечіткими множинами та лінгвістичними змінними, який на відміну від наявних моделей дозволяє враховувати інтегрально вплив кількісних та якісних параметрів на прогнозовану величину сумарних енерговитрат теплоізоляційної оболонки за умови забезпечення оптимального мікроклімату приміщень.

Отримані результати у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяють характеризувати поверхню належності лінгвістичних змінних, що описує відповідні параметри впливу як витрати енергії на капітальне будівництво, експлуатацію та рециклінг матеріалів за відповідними термами, на цільову функцію, за яку прийнято прогнозовані сумарні витрати на підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Новизна дослідження полягає в тому, що з використанням результатів моніторингу, формалізації та ієрархічної класифікації параметрів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель, яка характеризується сумарними витратами на капітальне будівництво, експлуатацію та рециклінг матеріалів, запропоновано концепцію вирішення науково-практичної задачі оцінювання енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель з урахуванням впливу кількісних та якісних чинників, а також дістали подальший розвиток методологічні основи математичного моделювання прогнозованої енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням математичного апарату нечіткої логіки та лінгвістичних змінних. Це сприятиме в перспективі розробленню системи інтелектуального підтримання прийняття організаційно-технологічних рішень щодо підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Практичне значення виявляється у можливості впровадження отриманих результатів при проектуванні енергоефективних нових або термомодернізації наявних огорожувальних конструкцій будівель, що сприятиме зменшенню використання енергоносіїв на забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату приміщень та декарбонізації систем теплозабезпечення.

References

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy vid 22.06.2017 № 2118-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2118-19>
2. Pro enerhozberezhennia: Zakon Ukrainy vid 01.07.94 r. № 74/94-VR. Data onovlennia: 23.07.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80#Text>
3. DBN V.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoeffektyvnist budivel. Chynnyi vid 2022-09-01.
4. Ratushniak H. S., Ratushniak O. H. “Upravlinnia proektamy enerhozberezhennia shliakhom termorenovatsii budivel”, 2006.
5. Ratushniak H.S., Biks Yu.S., Lialiuk A.O. “Orhanizatsiino-tekhnologichni chynnyky vplyvu na enerhoeffektyvnist ohorodzhuvalnykh konstruktsii budivel” Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi. №2, 2022. s. 203-210.
6. Fareniuk H.H. “Osnovy zabezpechennia enerhoeffektyvnosti budivel ta teplovoi nadiinosti ohorodzhuvalnykh konstruktsii budivel”, 2019.
7. Fareniuk H.H., Filonenko O.I., Tymofeiev M.V. “Enerhoeffektyvnist hromadskykh budynkiv z vrakhuvanniam erhonomiky teplovoho seredovyscha”. Nauk.-tekhn. zb. «Komunalne hospodarstvo mist», 2017. Vyp. 135. s. 119-124.
8. Podolets R.Z. “Enerhetychne modeliuvannia: inozemnyi dosvid inozemnykh perspektyvnykh doslidzhen v Ukraini”. Zb. Ekonomiko-matematychni metody i modeli prohozuvannia, 2006, pp. 126-140. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/19804/09--Podolec.pdf?sequence=1>
9. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Serdechnyi P.Iu. “Vykorystannia enerhetychnoho modeliuvannia budivel pry rozrobsi proektiv z pidvyshchennia enerhoeffektyvnosti” Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu. Serii tekhnichnykh nauk, №4 (136), 2019, pp. 86-96.
10. Tytiuk A.A. ta in. “Vykorystannia BIM-modeliuvannia dlia rozrakhunku teplovtrat ta zahalnoi enerhoeffektyvnosti na etapi proektuvannia”. Ukrainnyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury, №6 (018), 2023, pp. 119-124. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.118.1014>
11. Nakhodov V.F., Ivanko D.O., Holovko A.V. “Vybir metodiv matematychnoho

modeliuvannia protsesiv enerhospozhyvannia v systemakh operatyvnoho kontroliu enerhoefektyvnosti” Enerhetyka, ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia, Spetsvypusk, 2013 pp. 20-27.

12. Kashchenko T.O. "Enerhozberezhennia i prohnostyka v arkhitekturi". Mistobuduvannia. 2007, pp. 51-57. https://vlp.com.ua/files/11_5.pdf

13. Netesa K.M. "Vdoskonalennia ta vyznachennia ratsionalnykh orhanizatsiino-tekhnolohichnykh rishen vlashtuvannia fasadnykh system bahatopoverkhovykh tsyvilnykh budivel" avtoref. dys...., kand. tekhn. nauk. 05.23.08. 2021.

14. Biks Yu. S., Ratushniak H. S., Lialiuk O. H., Ratushniak O. H. "Potentsial enerhoefektyvnosti ohorodzhuvalnykh konstruksii iz biosferosumisnykh materialiv" 2022.

15. Trach R.V. "Informatsiine modeliuvannia v budivnytstvi (VIM). Sutnist, stan stanovlennia ta perspektyvy rozvytku." Hlobalni ta natsionalni prolemy ekonomiky, Iss. 16, 2017. pp. 490-495. <http://global-national.in.ua/issue-16-2017/24-vipusk-16-kviten-2017-r/2966-trach-r-v-informatsijne-modelyuvannya-v-budivnitstvi-bim-sutnist-etapi-stanovlennya-ta-perspektivi-rozvitku>

16. H.S. Ratushniak, Yu.S. Biks, A.O. Lialiuk. "Formalizatsiia ta iierarkhichna klasyfikatsiia parametriv vplyvu na enerhoefektyvnist ohorodzhuvalnykh konstruksii budivel". Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii u budivnytstvi. №2, 2023. pp. 98-103.

17. Tkachenko T.M. "Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky urbotsenoziv shliakhom stvorennia enerhoefektyvnykh tekhnolohii «zelenoho budivnytstva»" avtoref. dys. d-ra tekhn. Nauk: 21.06.01, 2018.

18. Khennynheen S. "Keruiuchy investytsiinym ryzykom". Zeleni hroshi, iss. 82, 2011, pp. 1-4.

19. Forster U., Khoks D., Norton V. "Enerhoefektyvni budivli. Arkhitektura, inzheneriia i navkolyshnie seredovyshe" 2012.

20. Jones P.D., Parker D.E., Oxborn T.I., Brista K.R. "Global and Hemisphenk Temperature Anomaleland and Marine Instrumental Rekorels" In Trends: A Compendium of Pate on Global Change. Oak Ridge. ITSA: Garbon Dioxide Information and Analysis Center. Oak Ringe. National Laboratory / U.S. Departament of Energy, 2001.

21. Ratushniak H.S. Biks Yu.S., Lialiuk A.O., Ratushniak D.A. "Modeliuvannia systemy intelektualnoi pidtrymky pryiniattia rishen z otsiniuvannia enerhoefektyvnosti ohorodzhuvalnykh konstruksii budivel z vykorystanniam linhvistychnykh zminnykh". Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi. №1, 2024. pp. 91-95.

22. Mitiushkin Yu.I., Mokin B.I., Rotshtein O.P. "Soft Computing: ydentyfykatsyia zakonomernostei nechetkymy bazamy znanyi", 2002

UDC 692.82

Professor Heorhiy Ratushnyak,
ratusnakg@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9656-5150,
Postgraduate Student Andriy Lyalyuk,
1b16blyalyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4803-1629
Vinnytsia National Technical University

EXPERT ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF ENCLOSURES OF BUILDING STRUCTURES BY FUZZY SETS AND LINGUISTIC VARIABLES

Abstract. *In accordance with the energy strategy of the European Union, a significant introduction of innovative technologies for decarbonization is planned through the implementation of energy-saving technologies to ensure optimal microclimate parameters in building premises. The relevant legislative framework of Ukraine regarding increasing the energy efficiency of the thermal insulation shell of buildings is dedicated to solving this problem.*

The development of tools for predicting the energy efficiency of external enclosing structures of buildings throughout their life cycle requires an assessment of the influence of determining parameters, which are characterized by quantitative and qualitative values. Determining the values of these parameters experimentally is expensive and in many cases impossible with a given reliability. As a source of necessary information, it is advisable to use expert assessments of the influence of determining parameters on the predicted energy efficiency of the thermal insulation shell of buildings.

To develop a component of the expert modeling system for intellectual support of organizational and technological decision-making on increasing the energy efficiency of building envelopes, the mathematical apparatus of fuzzy logic was used, namely, the method of constructing a system of fuzzy logical equations that characterize the degree of membership of an arbitrary element of universal sets to a fuzzy set. The method is based on the distribution of the degree of membership of the universal set, on which the fuzzy set is given, according to their ranks. The degrees of membership of parameters to a fuzzy set, which is defined by the corresponding term, were calculated using known formulas by composing the corresponding matrices. Fuzzy sets for various linguistic variables of determining parameters of the influence on the predicted energy efficiency of building envelopes are presented in the form of corresponding fuzzy logical equations. These equations characterize the surface of the membership of linguistic variables by the corresponding term to the objective function, namely energy consumption for capital construction or reconstruction, for operation and recycling.

Keywords: *energy efficiency, expert assessment, modeling, linguistic variables, logical equations, fuzzy sets, enclosing structures, thermal envelopment.*

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 52

Визнаний МОН України як наукове фахове видання України категорії “Б”, у якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття ступенів доктора і кандидата наук (Наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р.)

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

