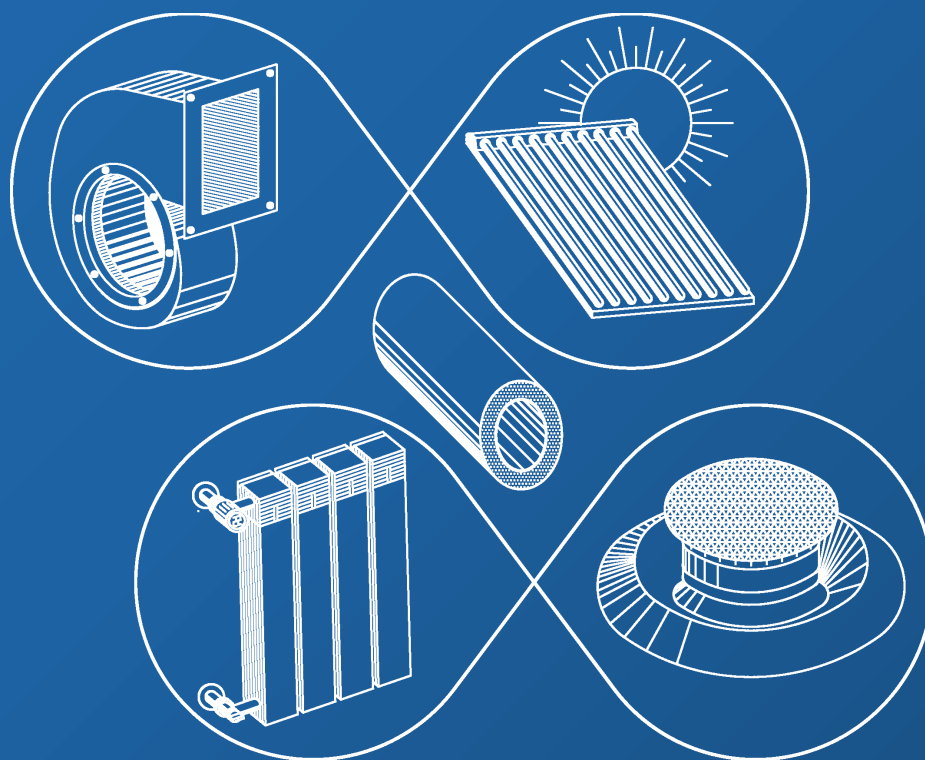


ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2024

Випуск 48



КИЇВ 2024

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 48

Kyiv 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 48

Київ 2024

УДК 697

ISSN 2409-2606

B29

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 48 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2024. – 77 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); докт. техн. наук, професор О. Токмаджян (Вірменія); докт. техн. наук, професор А. Маргарян (Вірменія); докт. техн. наук, доцент В. Токмаджян (Вірменія); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 29 березня 2024 р., протокол № 20.

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

Микола Белюженко, Михайло Сенчук

Резервування системи теплопостачання джерелами теплової енергії на біопаливі..... 6

Любов Макаренко, Олександр Приймак

Ефективність рециркуляційного повітроочищувача в реальних умовах при варіації продуктивності та вмісту PM2.5..... 21

Юрій Франчук, Вікторія Коновалюк

Використання біометану і водню у двигунах внутрішнього згоряння..... 32

Андрій Бондаренко, Євгеній Юрченко, Олена Коваль, Артем Коваль

Обґрунтування методу визначення повітропроникності будівель..... 40

Вадим Задіранов

Огляд досвіду утилізації скидної теплоти метрополітену..... 50

Андрій Редько, Ігор Редько, Артем Бородай, Сергій Андрух, Сергій Бородай

Розроблення пристрою для очищення геотермальної рідини від механічних домішок та розчинених газів..... 67

CONTENTS

Mykola Beliuzenko, Mykhailo Senchuk

*Reservation of the heat supply system with biofuel heat energy sources.....*6

Luibov Makarenko, Oleksandr Pryimak

*Effectiveness of the recirculation air cleaner in real conditions at variation of
the air flow and PM2.5 content.....*21

Yurii Franchuk, Viktoriia Konovaliuk,

*Use of biomethane and hydrogen in internal combustion engines.....*32

Andrii Bondarenko, Eugenii Yurchenko, Olena Koval, Artem Koval

*Determination of air permeability of buildings.....*40

Vadym Zadiranov

*Review of the experience in utilising waste heat from the metro.....*50

Andriy Redko, Ihor Redko, Artem Borodai, Serhii Andruh, Serhii Borodai

*Development of a device for cleaning geothermal fluid from mechanical
impurities and dissolved gases.....*67

УДК 697.34, 662.63

аспірант **Микола Белюженко**,
n.beliuuzhenko@gmail.com, ORCID: 0009-0005-4911-1654

к.т.н., доц. **Михайло Сенчук**,
smp_21@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8968-7336

Київський національний університет будівництва і архітектури

РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА БІОПАЛИВІ

Анотація. Проаналізовано впровадження резервування системи теплопостачання населеного пункту. Підвищення надійності теплопостачання споживачів є важливим завданням, особливо за воєнного стану в Україні. Вирішення проблеми розглянуто за резервування теплопостачання шляхом будівництва резервного джерела теплової енергії на альтернативних видах палива. Запропоновано комбіновану теплову схему приєднання водогрійного теплогенератора на біопаливі до наявної системи теплопостачання міста для підвищення її надійності і живучості, яка забезпечує ефективність та надійність експлуатації системи теплопостачання в опалювальний та літній періоди. Показано можливість експлуатації твердопаливного теплогенератора за значно меншої потужності від загального теплового навантаження теплопостачання міста за декількома режимами роботи: в опалювальний період – на підігрівання зворотного теплоносія на вході в наявну газову котельню; у літній період – на потреби гарячого водопостачання в повному обсязі; за аварійного вимкнення у зимовий період газової котельні – на підтримання життєздатності системи теплопостачання. Наведено результати розрахункового аналізу експлуатації теплогенератора на біопаливі потужністю 5,0 МВт за різних режимів роботи. Підігрівання зворотного теплоносія на 4...5 °С у зимовий період, крім економії природного газу, запобігає низькотемпературній корозії газових котлів. За аварійної відсутності газопостачання спалювання деревної тріски забезпечує виробництво теплової енергії на рівні тепловтрат теплової мережі з підтриманням температури теплоносія не нижче 3 °С за розрахункової зовнішньої температури повітря. Завдяки акумулюванню теплоти в нічний час літнього періоду в об'ємі труб теплової мережі, як буферній посудині, забезпечується компенсація пікового споживання гарячої води за наявної потужності твердопаливної котельні рівній середньому навантаженню гарячого водопостачання. За реалізації проєкту резервування системи теплопостачання м. Луцька за комбінованою тепловою схемою приєднання твердопаливної котельні досягнуто підвищення надійності і життєздатності

системи та економію природного газу на рівні 40,5 % протягом року експлуатації.

Ключові слова: теплогенератор на біопаливі; твердопаливна котельня; система теплопостачання; акумулювання теплової енергії; резервування теплопостачання; надійність теплопостачання; живучість системи.

Вступ. Одним з актуальних питань сьогодення є питання енергетичної незалежності та диверсифікація постачання природного газу з відмовою від послуг країни агресора для забезпечення надійності роботи підприємств централізованого теплопостачання. Вирішення цієї проблеми можливе при розроблені плану розвитку підприємств в містах на всій території України.

Більшість підприємств централізованого теплопостачання експлуатують застаріле енергетичне устаткування радянського часу, а саме газові котли типу ТВГ, КВГ, НІСТУ, ПТВМ, КВ-ГМ та парові котли, які було переведено на водогрійний режим. Експлуатація їх здійснюється за низьких ККД роботи, підвищеному споживанні газу та енергоспоживанню, що в свою чергу призводить до неефективного використання енергії палива.

Одним із основних методів підвищення надійності систем теплопостачання є резервування [1], зокрема шляхом будівництва резервних джерел теплової енергії (стаціонарних або пересувних котельних) на альтернативному виді палива. Україна має високий потенціал біомаси. Рациональним є використання як паливо наявних місцевих видів біопалива, зокрема органічні відходи та побічні продукти, що виникають в сільському, лісовому, комунальному та домашньому господарстві, промисловості, а також деревина лісів, продукти водних середовищ та енергетичні культури рослин [2, 3]. До останніх відносяться сорти дерев, що швидко ростуть (наприклад, енергетична верба) і спеціальні однорічні рослини - топінамбур, міскантус та інші з високим вмістом сухої маси для використання після попереднього підготовлення як твердого палива.

Актуальність дослідження. Воєнний стан в Україні з 24 лютого 2022 року суттєво загострив проблему залежності від російського газу нашої країни та європейських держав, що негативно впливає на державну енергетичну безпеку. Розвиток використання альтернативних джерел енергії та ринку біомаси має стати стратегічним питанням розвитку на загальнодержавному рівні, що у свою чергу дозволить вирішити питання надійності роботи підприємств та енергетичної незалежності країни. Впровадження практичних заходів щодо підвищення надійності роботи систем централізовано теплопостачання міст зі зниженням частки природного газу є актуальним завданням.

Останні дослідження та публікації. Проблеми диверсифікації джерел енергопостачання на території України та використання нетрадиційних джерел

енергії висвітлено Законами України [4-6] та Розпорядженням Кабінету Міністрів [7]. Підвищення енергетичної ефективності в системах централізованого теплопостачання є одним із факторів стратегічного напрямку політики посилення енергетичної безпеки України. Якщо в країнах Північної Європи централізоване теплопостачання знаходиться в стадії інтенсивного розвитку, то в Україні потребує рішучих заходів щодо модернізації наявних систем та будівництву нових, з урахуванням європейського досвіду [8]. Вважається, що стратегії декарбонізації мають стати пріоритетними в модернізації і проектуванні нових систем централізованого теплопостачання, зокрема поступового максимального заміщення викопного палива біопаливом і біогазом, що дозволить відмовитися від імпортного газу. Скорочення використання палива планується досягати також завдяки технічним заходам акумулювання теплової енергії. Модернізація наявних систем централізованого теплопостачання передбачає реконструкцію газових котельних з підвищенням їхньої енергоефективності зі зниженням витрати палива та забезпеченням екологічних показників роботи, заміну їх на твердопаливні котельні або застосування твердопаливних джерел теплової енергії, як резервних. Розробленню заходів щодо поліпшення незадовільного стану систем теплопостачання міст України та зменшення використання природного газу присвячено багато наукових робіт [9-16].

На промисловому ринку України представлено теплогенератори для спалювання біопалива за широкою номенклатурою за конструкцією, рівнем механізації технологічних процесів спалювання, виду спалюваного палива, потужності тощо. Найбільш ефективними є теплогенератори з механічними топковими пристроями з максимальною автоматизацією технологічних процесів, серед яких з системою очищення конвективних теплообмінних поверхонь. Їх конструкція забезпечує спалювання сортового біопалива: деревної тріски та пелетів за високої ефективності та екологічних показників на рівні європейських вимог.

Приєднання резервного джерела теплової енергії до наявної системи теплопостачання можна здійснювати за такими схемами [17] :

- залежна – схема приєднання до теплової мережі, за якої теплоносій з теплової мережі надходить безпосередньо до контуру теплогенератора на біопаливі. За такою схемою є вплив теплової мережі на резервний контур, що призводить до нестабільного гідравлічного режиму його роботи;
- незалежна – схема приєднання до теплової мережі, за якої теплова енергія, вироблена в контурі теплогенератора на біопаливі, передається теплоносію наявної системи теплопостачання через поверхневий теплообмінник, що забезпечує незалежність гідравлічного контуру

резервного джерела від наявного гідравлічного режиму в трубопроводах теплової мережі.

Щоб уникнути низькотемпературної корозії, температуру зворотного теплоносія на вході до котла необхідно підтримувати на рівні 60-70 °С, що вище температури точки роси димових газів. Принципові теплові схеми водогрійних котельних, методика розрахунку та вибір основного й допоміжного обладнання розглядають в роботах [18, 19 та ін.].

Метою роботи є розрахунковий аналіз практичного досвіду впровадження резервування системи централізованого теплопостачання міста з використанням теплогенератора на біопаливі як одного із заходів підвищення енергетичної безпеки України та зменшення об'ємів використання природного газу.

Комбінована схема резервування теплопостачання. У роботі запропоновано комбіновану технологічну схему резервування системи теплопостачання для підвищення її надійності та живучості. Схема заснована на приєднанні до наявного джерела теплової енергії, яке працює на природному газі, додаткового джерела теплової енергії – теплогенератора на твердому паливі, зокрема біопаливі. Теплогенератор може бути розміщений в будівлі наявної котельні або в транспортабельній котельні з подальшим приєднанням до системи централізованого теплопостачання за незалежною схемою (рис.1).

Експлуатація теплогенератора на біопаливі за комбінованої схеми приєднання передбачається за декількома режимами роботи:

- в опалювальний період – на підігрівання зворотного теплоносія на вході в наявну газову котельню;
- у літній період – на потреби гарячого водопостачання в повному обсязі;
- за аварійного вимкнення в зимовий період газової котельні – на підтримання життєздатності системи теплопостачання.

Для забезпечення нормованих показників по вмісту твердих частинок у відхідних газах після теплогенератора на біопаливі (1) резервна твердопаливна котельня оснащується двоступеневою системою очищення [23]: мультициклоном (2) та електрофільтром (3), які забезпечують очищення димових газів від твердих домішок до їх масової концентрації менше ніж 50 мг/м³. Для подолання димовими газами місцевих опорів з подальшим відведенням в димову трубу (5), застосована штучна тяга димососом (4).

Тепловий контур твердопаливного теплогенератора приєднано до теплової мережі за незалежною схемою через пластинчасті теплообмінники (9). Циркуляцію теплоносія в котловому контурі забезпечують насоси (6), які працюють при постійній витратній характеристиці. Уникнення виникнення конденсату в газоходах котла та захисту його від низькотемпературної корозії виконано шляхом встановлення триходового регулювального клапана (7).

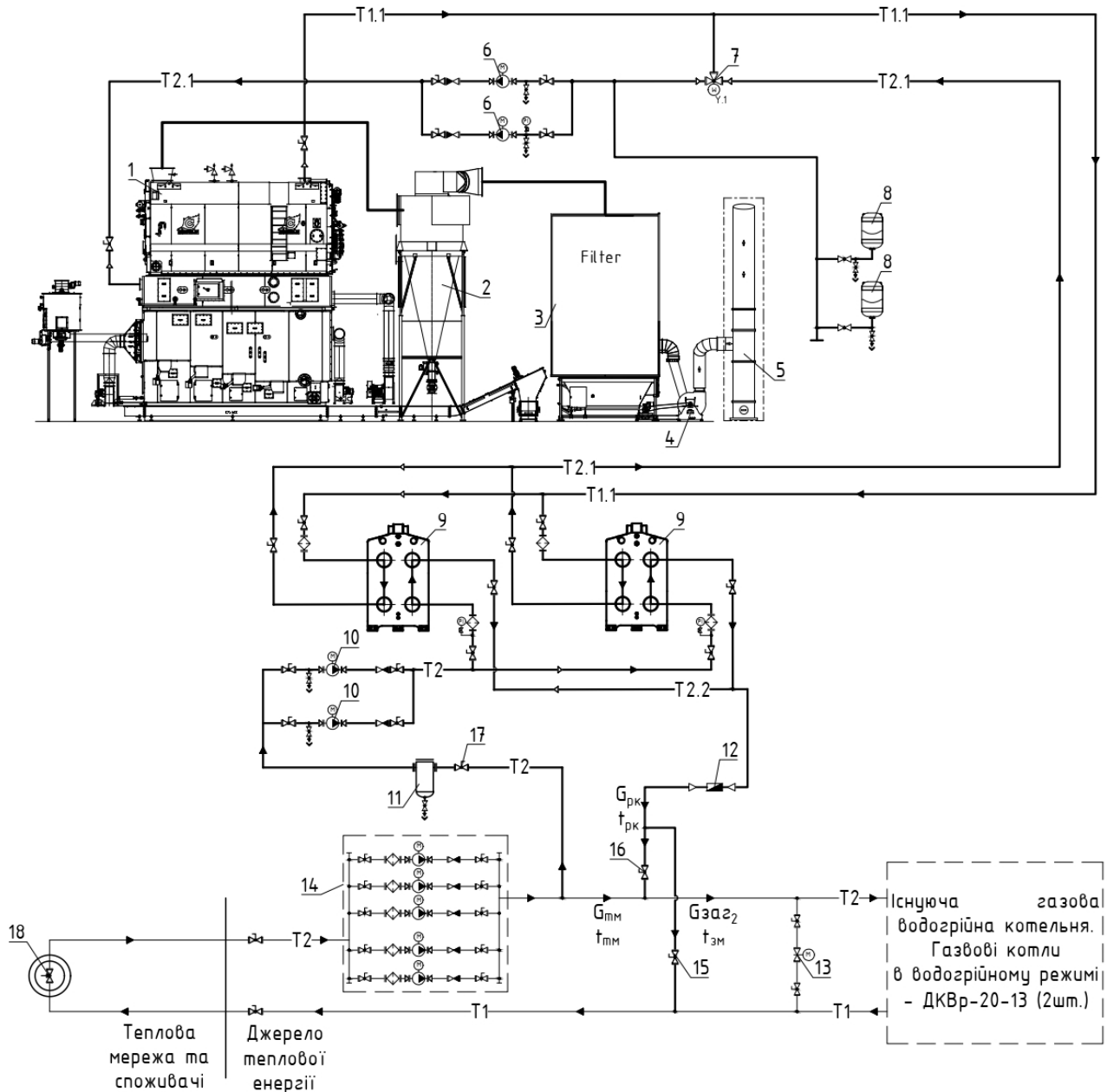


Рис. 1. Принципова схема встановлення твердопаливного теплогенератора для резервування системи централізованого теплопостачання

Зазначений клапан підтримує температуру води на вході в котел не менше 70 °С. Запобігання аварійного підвищення тиску від температурного розширення теплоносія забезпечують розширювальні баки (8).

Резервний тепловий контур приєднано до теплової мережі через вузол обліку теплової енергії (12). Для доочищення мережної води теплових мереж перед циркуляційними насосами (10) встановлено грязьовик (11) та запірна арматура (17). Приєднання трубопроводу нагрітої води резервного контуру виконано через запірну арматуру (15, 16) до зворотного і подавального трубопроводів теплової мережі.

Циркуляція теплоносія в гідравлічному контурі теплової мережі забезпечується наявними циркуляційними мережевими насосами (14). Для забезпечення сталого гідравлічного режиму теплової мережі в схемі передбачено перепускную лінію з регулювальним клапаном (13), який забезпечує рівномірне розподілення теплоносія в газовій котельні, підтримує потрібний перепад тиску на резервному контурі та величину тиску до споживача на відпуску з джерела теплової енергії. Циркуляційні насоси (10) резервного контуру працюють тільки в опалювальний період, у літній період при забезпеченні споживачів тільки гарячою водою циркуляція забезпечується наявним перепадом тиску в тепловій мережі.

Для забезпечення циркуляції та прогріву теплової мережі у період відсутності водорозбирання, на кінцевому споживачі виконується лінія перепуску (18) з трубопроводу подавальної мережі Т1 в трубопровід зворотної мережі Т2.

Наведену технологічну схему резервування впроваджено згідно з проектом ЄБРР «Проект централізованого теплопостачання м. Луцьк. Програма корпоративного розвитку» [20]. У обсязі проекту виконано реконструкцію наявної газової водогрійної котельні з двома котлами ДКВР-20-13(в) продуктивністю 16,3 МВт кожний з розміщенням у будівлі теплогенератора на біопаливі потужністю 5,0 МВт, що спалює деревну тріску. Ця котельня забезпечує послугами централізованого теплопостачання системи опалення та гарячого водопостачання споживачів мікрорайонів міста Луцьк.

Теплове навантаження споживачів становить 36,36 МВт:

- на систему опалення – 23,72 МВт;
- на систему гарячого водопостачання:
 - максимальне – 12,64 МВт;
 - максимальне в літній період – 11,34 МВт;
 - середнє в літній період – 4,73 МВт.

Температурний графік теплової мережі:

- у зимовий період – 105-70 °С,
- у літній період – 65-40 °С;
- температурний графік контуру біопаливного котла – 95-75 °С.

Режими роботи комбінованої котельні:

- в опалювальний період виконується комбіноване вироблення теплової енергії – теплогенератор на біопаливі працює сумісно з наявними газовими водогрійними котлами ДКВР-20-13(в);
- в міжопалювальний період котельня працює лише на деревній трісці для забезпечення споживачів системи ГВП з передпідключенням до даного джерела теплової енергії інших споживачів міста;

- режим збереження живучості системи теплопостачання та підтримання температури теплоносія не нижче 3 °С – у випадку позаштатної ситуації та відсутності природного газу на котельні в зимовий період.

Резервним джерелом теплоти є теплогенератор потужністю 5,0 МВт COMPT.E.R по спалюванню деревної тріски з механізацією всіх технологічних процесів спалювання сортового біопалива і системою автоматизації керування і безпеки за екологічних показників та ефективності роботи на рівні європейських вимог. Конструкція теплогенератора складається з двох частин: механічної топки та водогрійного котла. Механічна топка обладнана похилою колосниковою решіткою з трьома зонами підготовки та горіння палива:

- сушіння вологого натурального палива;
- газифікації та первинного згорання;
- повного згорання.

Для автоматичного очищення димогарних труб на кришці котла змонтована автоматична система очищення стисненим повітрям.

Експлуатація теплогенератора за автоматичного регулювання дає можливість наладжувати різні потрібні режими роботи в літній та зимовий періоди.

Аналіз режимів роботи резервного джерела теплової енергії.

Режим роботи комбінованої котельні в опалювальний період. Протягом опалювального періоду наявна система теплопостачання експлуатується за температурним графіком 105-70 °С зі «зрізкою» на систему гарячого за постійної витрати теплоносія 940 м³/год. Температурний графік роботи теплогенератора на біопаливі потужністю 5,0 МВт становить 95-75 °С. Теплоносій з постійною витратою 220 м³/год із зворотного трубопроводу системи централізованого теплопостачання з температурою, відповідно до температурного графіку теплової мережі, трубопроводами резервного контуру подається на проєктні пластинчасті теплообмінники джерела теплової енергії на біопаливі та догрівається до розрахункової величини. Підігрітий в теплообмінниках теплоносій направляється назад до зворотного трубопроводу наявних теплових мереж, змішується з холоднішим теплоносієм, підвищуючи його температуру на вході в газові котли.

Температура теплоносія в точці змішування потоків теплоносія резервного контуру та у зворотній магістралі теплової мережі дорівнює:

$$t_{зм} = (G_{рк} \cdot t_{рк} + G_{тм} \cdot t_{тм}) / (G_{рк} + G_{тм}), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де $G_{рк}$, $G_{тм}$ – відповідно, витрата мережної води у зворотному трубопроводі

резервного контуру та на ділянці його приєднання до зворотної магістралі теплової мережі, $\text{м}^3/\text{год}$; t_{pk} , t_{tm} – відповідно, температура зворотного теплоносія резервного контуру та теплової мережі в точці злиття потоків, $^{\circ}\text{C}$.

Розрахунковий аналіз зміни температури в точці змішування наведено на рис.2.

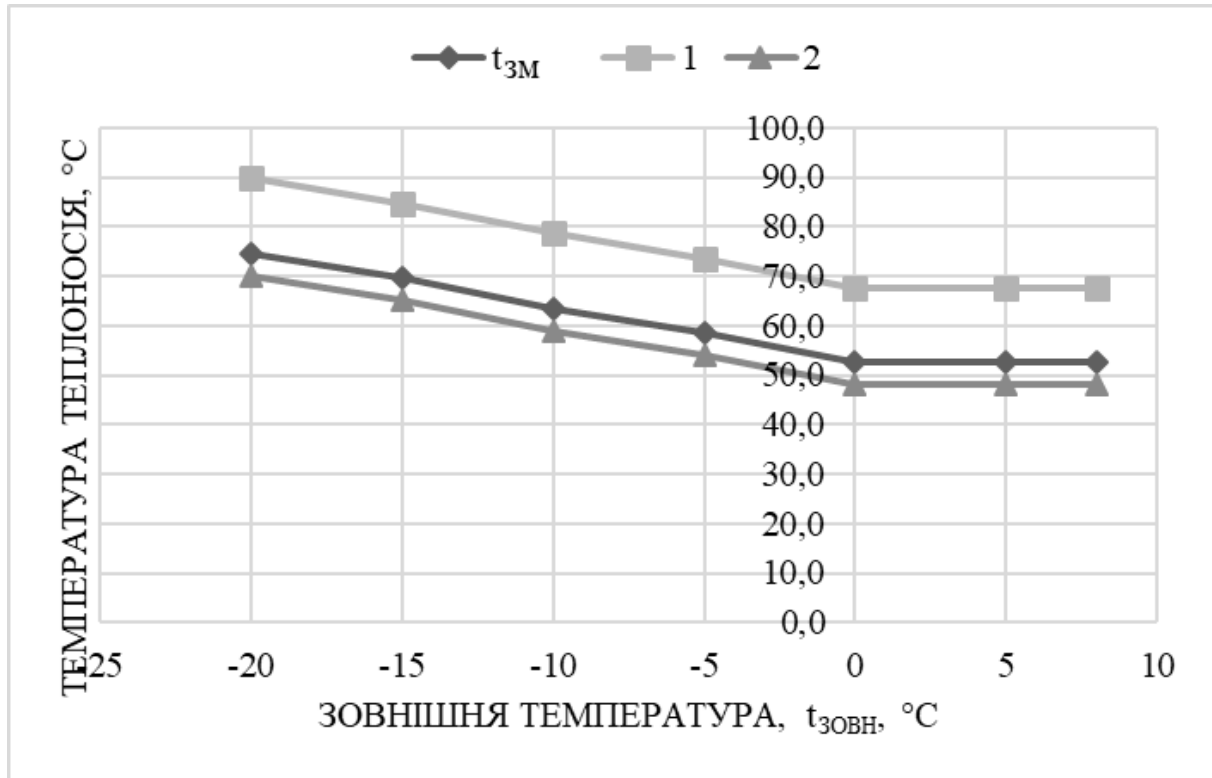


Рис. 2. Аналіз зміни температури в точці змішування:

1 – температура зворотного теплоносія резервного контуру, $^{\circ}\text{C}$; 2 – температура зворотного теплоносія теплової мережі до підігрівання, $^{\circ}\text{C}$

Теплогенератор на біопаливі працює на постійному номінальному навантаженні без змін робочих параметрів та забезпечує підігрів зворотного теплоносія в тепловій мережі на $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$. Підігрівання теплоносія перед наявним джерелом теплової енергії дозволяє запобігти утворення низькотемпературної корозії в газових котлах та зменшити кількість виробленої теплової енергії на природному газі. Догрівання теплоносія системи теплопостачання до нормативної температури в подавальному трубопроводі на відпуску до споживача, відповідно до температурного графіку, здійснюється газовими котлами.

Зміну теплового навантаження системи централізованого теплопостачання протягом опалювального періоду наведено на рис. 3.

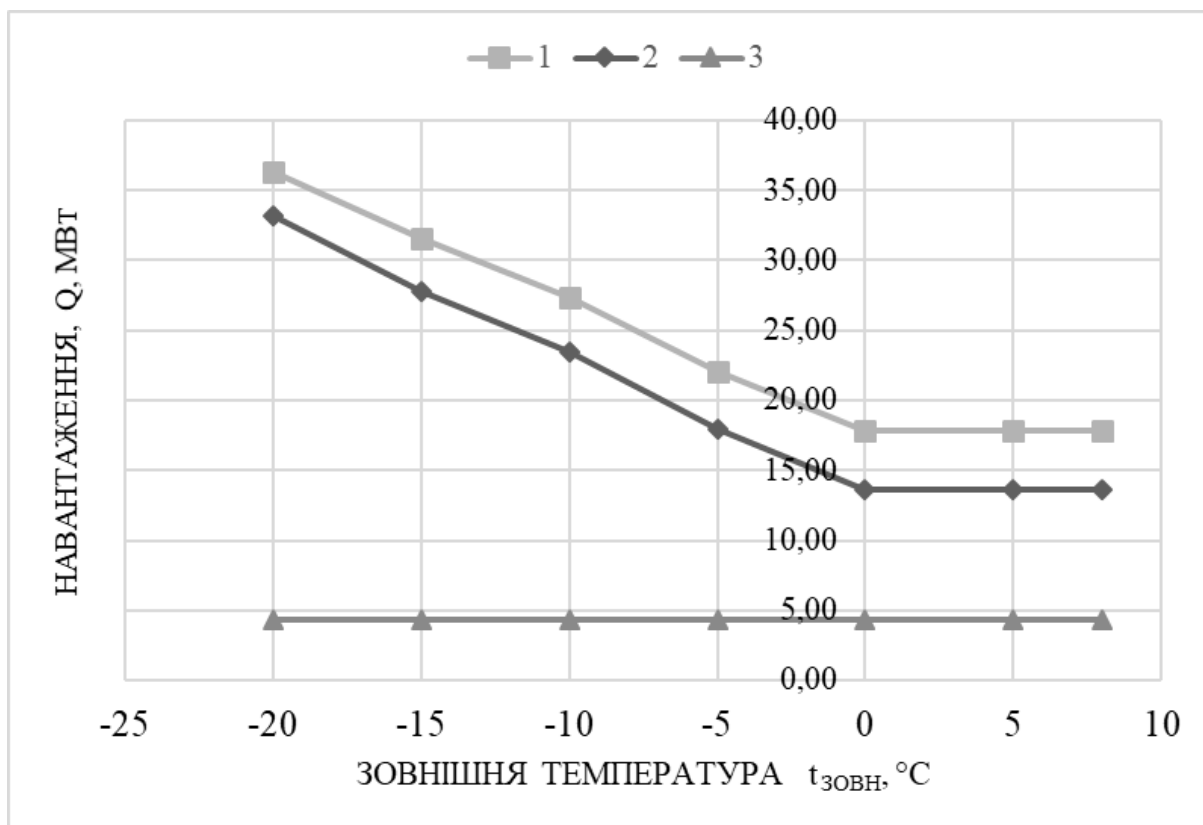


Рис. 3. Аналіз зміни навантаження системи централізованого теплопостачання:

1 – теплове навантаження теплової мережі, МВт; 2 – відпуск виробленої теплової енергії газовою котельнею, МВт; 3 – відпуск виробленої теплової енергії твердопаливною котельнею, МВт

У випадку аварійної ситуації та відсутності постачання природного газу, котельня на біопаливі дозволяє компенсувати теплові втрати теплової мережі та підтримувати температуру теплоносія не нижче $3\text{ }^\circ\text{C}$.

Режим роботи комбінованої котельні у міжопалювальний період.

Потужність резервного теплогенератора на біопаливі у складі комбінованої котельні вибрано для забезпечення середнього навантаження споживачів системи гарячого водопостачання (ГВП) в літній період. Забезпечення потреб споживачів системи ГВП за температурним графіком $65\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$ здійснюється лише теплогенератором на біопаливі. Теплоносій від трубопроводу зворотної мережі в кількості $150\text{ м}^3/\text{год}$ та з температурою $40\text{ }^\circ\text{C}$ подається на проєктні пластинчасті теплообмінники джерела теплової енергії на біопаливі та догрівається до заданої температури. Підігрітий теплоносій направляється назад в подавальний трубопровід наявних теплових мереж та надходить до споживачів системи гарячого водопостачання. Циркуляція теплоносія забезпечується наявними мережними циркуляційними насосами.

Ураховуючи те, що потужності теплогенератора на біопаливі недостатньо для забезпечення пікового навантаження системи ГВП, потрібно забезпечити

акумуляції теплової енергії шляхом застосування мережних зворотних трубопроводів як буферної посудини, та має таке призначення:

- акумуляції виробленої теплової енергії для подальшої передачі в систему ГВП та компенсація навантаження в піковий період;
- забезпечення безаварійної роботи теплогенератора та запобігання можливості закипання теплоносія;
- підвищення ККД роботи теплогенератора на біопаливі завдяки забезпеченню стабільного режиму роботи та повного спалювання палива;
- забезпечення сталого режиму роботи та підвищення терміну експлуатації теплогенератора.

При реалізації проєкту зі встановлення теплогенератора на біопаливі передбачено акумуляувати необхідну кількість теплоти в наявному трубопроводі зворотної тепломережі для роботи в години пік, а саме шляхом підігрівання зворотного мережного теплоносія до температури 65 °С у період відсутності споживання гарячої води.

Кількість необхідної теплоти для акумуляції становить:

$$Q_{max} = V_{зв} \cdot (t_{2к} - t_{2п}) \cdot c_{\text{в}} \cdot \xi_{\text{т}} \cdot 10^{-3}, \text{ МВт}, \quad (2)$$

де $V_{зв}$ – об'єм трубопроводу зворотної мережі, м³; $c_{\text{в}}$ - питома теплоємність води, кДж/(кг · °С); $t_{2к}$, $t_{2п}$ – відповідно, кінцева та початкова температура мережної води у зворотній магістралі, °С; $\xi_{\text{т}}$ – коефіцієнт теплових втрат в теплових мережах, у розрахунках прийнято 15 %.

На об'єкті впровадження як буферна посудина використовують об'єм наявних теплових мереж, який становить 2030 м³. Таким чином об'єм зворотної магістралі, в якій забезпечується акумуляція теплової енергії від початкової температури 40 °С до кінцевої температури нагріву теплоносія 65 °С, становить половину всього об'єму теплової мережі тобто $V_{зв}=1015$ м³. Тоді, за формулою (2) буде акумуляовано максимальну кількість теплової енергії 25,1 МВт.

Виконано аналіз підігрівання теплової мережі та акумуляції теплової енергії в період відсутності водорозбирання (рис. 4). У тепловій мережі відсутнє водорозбирання в період з 23:00 год до 5:00 ранку. Таким чином, нагрівання та акумуляція теплової енергії здійснюється протягом 6 год. Тоді номінальна теплова потужність роботи теплогенератора буде 4,2 МВт, що становить 82 % від встановленої потужності.

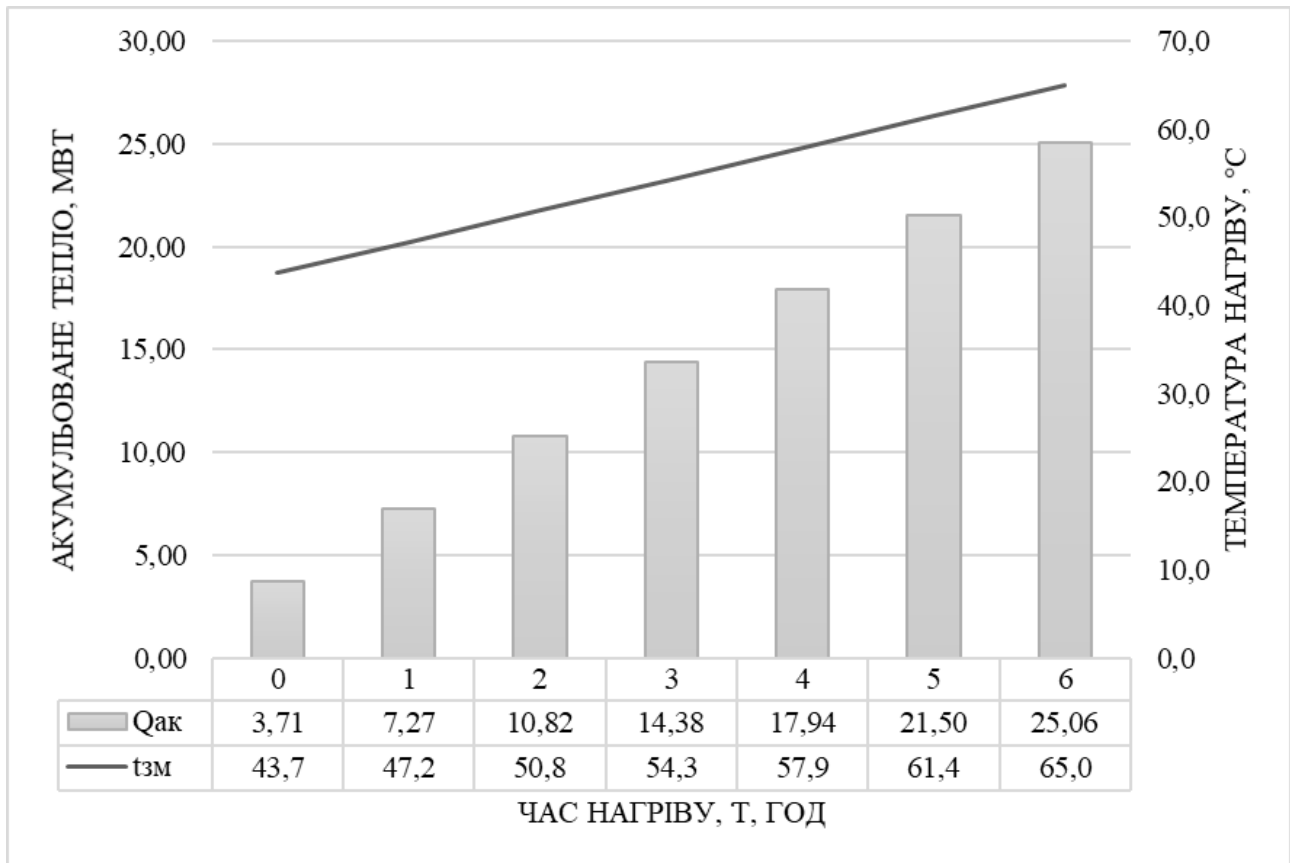


Рис. 4. Аналіз роботи теплогенератора в міжопалювальний період:

$Q_{ак}$ – теплове навантаження теплової мережі

Отже, в нічний період протягом 6 год у період відсутності водорозбирання здійснюється підігрівання теплової мережі та підтримання температури 65 °С, що забезпечує акумулювання теплової енергії 25,1 МВт в буферній посудині теплової мережі.

Максимальне водорозбирання в системі гарячого водопостачання відбувається в період з 6:00 до 10:00 години дня та з 17:00 до 20:00 години вечора. Оскільки пікових станів фактично два по 4 години вранці та ввечері, то дефіцит теплоти покривається акумульованою вночі та вдень теплотою.

Навантаження у піковий період споживання системи гарячого водопостачання в літній період становить $Q_{max} = 11,34$ МВт, тобто при роботі теплогенератора на номінальну потужність 5,0 МВт дефіцит виробленої теплової енергії становить 6,34 МВт. Тоді, акумульованої теплової енергії в буферній посудині вистачає на компенсацію дефіциту в піковий період протягом $25,1/6,34=4,0$ годин.

Впроваджена твердопаливна котельня в місті може забезпечувати споживачів гарячою водою в міжопалювальний період у період припинення постачання природного газу.

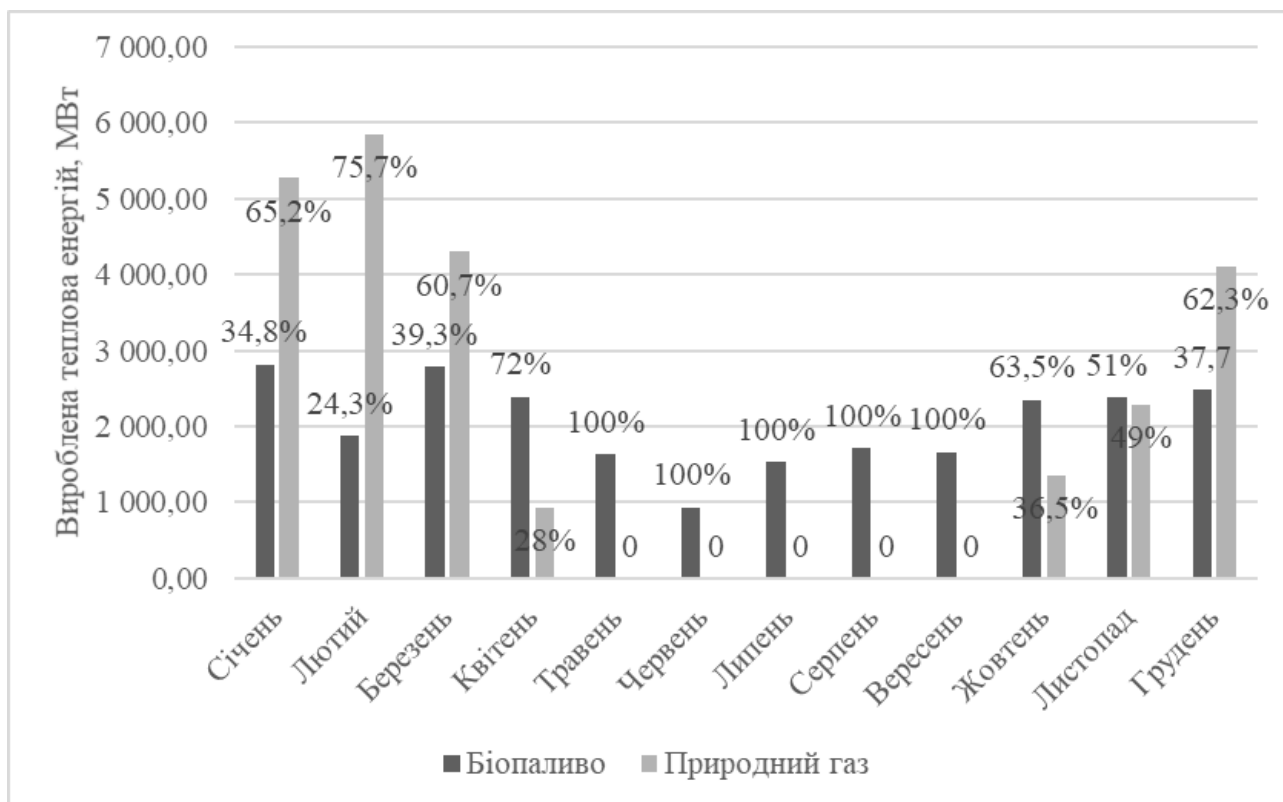


Рис. 5. Помісячний аналіз обсягу виробництва теплової енергії на діючій комбінованій котельні, що базується на основі показів теплових лічильників

З урахуванням усереднених показників за фактом роботи наявної котельні за останні роки, можна спрогнозувати обсяг виробництва теплової енергії для комбінованої котельні (рис. 5) та рівень зменшення споживання природного газу.

Згідно з наведеним аналізом виробництво теплової енергії в опалювальний період теплогенератором на біопаливі забезпечує зменшення споживання природного газу. В неопалювальний період виробництво теплової енергії забезпечується повністю на біопаливі та заміщує споживання природного газу на 100 %. За рахунок реалізації проєкту було досягнуто скорочення споживання природного газу на 2738 тис. м³/рік, що становить близько 40,5 % споживання газу котельнею в рік.

Висновки

Диверсифікація постачання природного газу суттєво впливає на енергетичну незалежність України та надійність функціонування всієї системи теплопостачання міст. Запропонована схема впровадження теплогенератора на біопаливі меншої потужності в наявній системі теплопостачання забезпечує три режими роботи теплогенератора: літній режим – забезпечення потреби системи гарячого водопостачання; зимовий режим – підігрівання зворотного теплоносія, що призводить до зменшення витрати природного газу та захисту газових котлів

від низькотемпературної корозії; підтримання живучості системи теплопостачання. Завдяки акумулюванню теплової енергії в період відсутності споживання гарячої води в об'ємі труб теплової мережі як буферній ємності, забезпечується компенсація пікового споживання гарячої води за наявної потужності твердопаливної котельні рівній середньому навантаженню системи гарячого водопостачання. За реалізації проєкту резервування системи теплопостачання міста Луцька за комбінованою тепловою схемою приєднання твердопаливної котельні досягнуто підвищення надійності і живучості системи та річну економію природного газу на рівні 40,5 %. Набутий науково-практичний досвід є корисним для реалізації аналогічних проєктів.

References

1. Teplopostachannia. DBN V.2.5-39:2008, Ukrarkhbudininform, 2014.
2. Geletukha G. "Vyrobnyststvo enerhii z biomasy v Ukraini: tekhnolohii, rozvytok, perspektyvy". Vyd. dim "Akademperiodyka", Kyiv, 2022. (in Ukrainian).
3. Shcherbyna S. V. "Modernizatsiia ahrarnoho biznesu v Ukraini dlia rozvytku vyrobnystva biopalyva". Vcheni zapysky Universytetu "KROK", no. 4 (64), 2021, pp.153-163. (in Ukrainian).
4. Zakon Ukrainy "Pro alternatyvni dzherela enerhii" No. 555-IV of 20.02.2003. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>.
5. Zakon Ukrainy "Pro alternatyvni vydy palyva" No. 1391-XIV of 14.01.2000. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>.
6. Zakon Ukrainy "Pro teplopostachannia" No. 2633-IV of 02.06.2005. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>.
7. Kontseptsiiia realizatsii derzhavnoi polityky u sferi teplopostachannia. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 18.08.2017: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80/print>.
8. Glamazdin P. "New approaches to the organization of district heating." Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohazopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Iss. 39, 2021, pp. 38-46. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.39.38-46>
9. "Doslidzhennia, rozrobka rekomendatsii ta alhorytmu dii subiektiv hospodariuvannia, yaki maiut namir realizuvaty proekty z vyrobnystva teplovoi ta elektrychnoi enerhii (z vykorystanniam «zelenoho taryfu») z biomasy". Report prepared by LLC "Instytut mistsevoho rozvytku", Kyiv, 2014. (in Ukrainian).
10. Havrys O. M. "Optymizatsiia system teplopostachannia iz vykorystanniam ekonomiko-matematychnoho modeliuvannia: monograph". NTU "KhPI", Kharkiv, 2015. (in Ukrainian).

11. Geletukha G. “Pidhotovka ta vprovadzhennia proektiv zamishchennia pryrodnoho hazu biomasoiu pry vyrobnytstvi teplovoi enerhii v Ukraini.” Polygraph plus, 2015. (in Ukrainian).
12. Senchuk M.P. “Increasing the efficiency of burning solid fuel in the layer”. Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Iss. 39, 2021, pp. 29-37. (in Ukrainian).
13. Roskovshenko Yu.K., Senchuk M.P. “Reservation of heat supply in populated areas”. Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Iss. 15, 2011, pp. 46-50. (in Ukrainian).
14. Galchynska Ju. “Stymuliuvannia rozvytku rynku vidnovliuvanoi enerhetyky v Ukraini za dopomohoiu «zelenoho» taryfu.” Agrosvit, no. 7, 2019, pp. 49–54. (in Ukrainian).
15. Gutsalenko I., Fabiyanska V. “Stan ta osnovni chynnyky rozvytku vyrobnytstva biolohichnoho palyva v Ukraini ta sviti”. Scientific papers of Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, Iss. 19, 2013, pp. 168-174. (in Ukrainian).
16. Sugiyono A. «Potential of biomass and coal co-firing power plants in Indonesia: a PESTEL analysis». IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 963, 2022.
17. Yenin P. M., Shvachko N. A. “Teplopostachannia (Chastyna I “Teplovi merezhi ta sporudy”).” Educational manual”. Vyd. dim “Condor”, Kyiv, 2007. (in Ukrainian).
18. Alabovskyi O. M., Bozhenko M. F. “Proektuvannia kotelen promyslovykh pidpriemstv: kursove proektuvannia z elementamy SAPR.” High School, Kyiv, 1992. (in Ukrainian).
19. Bozhenko M. F. “Vodohriini kotelni dlia system detsentralizovanoho ta pomirno-tsentralizovanoho teplopostachannia.” Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2022. (in Ukrainian).
20. “Proiekt tsentralizovanoho teplopostachannia m. Lutsk. Prohrama korporatyvnoho rozvytku.” Report prepared by LLC “Instytut mistsevoho rozvytku”. 2018. (in Ukrainian).

UDC 697.34, 662.63

PG. Mykola Beliuzhenko,
n.beliuzhenko@gmail.com, ORCID: 0009-0005-4911-1654
PhD, associate professor, Mykhailo Senchuk,
smp_21@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8968-7336,
Kiev National University of Construction and Architecture

RESERVATION OF THE HEAT SUPPLY SYSTEM WITH BIOFUEL HEAT ENERGY SOURCES

Abstract. *The implementation of the reservation of the heat supply system to a populated area was analyzed. It is noted that increasing the reliability of heat supply to consumers is a fundamental task, especially given the current military situation in Ukraine. The solution to this difficulty is considered when reserving heat supply by constructing a backup source of thermal energy using alternative types of fuel. A combined thermal scheme for connecting a hot water heat generator using biofuel to the existing city heat supply system is proposed to increase its reliability and survivability, which ensures the efficiency and reliability of operation of the heat supply system during the heating and summer periods. It is shown the possibility of operating a solid fuel heat generator with its power significantly less than the total heat load of the city's heating supply in several operating modes: during the heating period - for heating the return coolant at the inlet to the existing gas boiler house; in the summer period - for the needs of hot water supply in full; in the event of an emergency shutdown of a gas boiler house in winter - to maintain the viability of the heat supply system. The results of a calculation analysis of the operation of a 5,0 MW biofuel heat generator under different operating modes are presented. Heating the return coolant by 4...5 °C in winter, in addition to saving natural gas, prevents low-temperature corrosion of existing gas boilers. In the event of an emergency lack of natural gas supply, the combustion of wood chips ensures the production of thermal energy at the level of thermal losses of the heating network while maintaining the coolant temperature at least 3 °C at the calculated external air temperature. Thanks to the accumulation of thermal energy at night in the summer period in the volume of heating network pipes as a buffer tank, compensation for peak hot water consumption is provided with the available power of the solid fuel boiler house equal to the average load of the hot water supply system. When implementing a project to back up the heat supply system in Lutsk using a combined thermal scheme for connecting a solid fuel boiler house, an increase in the reliability and viability of the system and natural gas savings of 40,5% during a year of operation were achieved.*

Key words: *biofuel heat generator, solid fuel boiler house, heat supply system, thermal energy accumulation, heat supply reservation, heat supply reliability, system survivability.*

УДК 697.941+697.98.

аспірантка Любов Макаренко,
2222555@ukr.net, ORCID: 0009-0005-9024-8521,
д.т.н., проф. Олександр Приймак,
02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПОВІТРООЧИЩУВАЧА В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ПРИ ВАРІАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ВМІСТУ PM2.5.

Анотація. Технічні дані ефективності очищення повітря в повітроочищувачах отримано, зазвичай, у лабораторних умовах у спеціальних аерозольних стендах з тестовими камерами чи боксами незначного об'єму, у той час, як у реальних умовах очищувачі використовуються в приміщеннях об'ємом мінімум 40-60 м³ з постійним перебуванням людей (розповсюдження респіраторних захворювань, що виділяються з диханням) та надходженням в приміщення частинок PM2.5..PM10 від обладнання, що працює (принтери, зарядні пристрої, електроінструмент і т.д.). На сьогодні є достатньо досліджень з цього приводу, які доводять, що фактична ефективність очищення повітря в повітроочищувачі в реальних умовах значно нижча, ніж дані наведені виробниками. Тож, є необхідність визначення оптимальної продуктивності повітроочищувача в реальних умовах для досягнення рекомендованих Всесвітньою організацією охорони здоров'я рівнів безпечного забруднення в приміщеннях з максимальним часовим проміжком одна година. Слід урахувати, що зовнішнє повітря має більший рівень забруднення частками PM 2.5. У цьому дослідженні отримуватимемо значення PM2.5 5 мкг/м³ при рівні PM2.5 в зовнішньому повітрі 16,7 мкг/м³.

Ключові слова: кратність повітрообміну, CADR, механічна фільтрація повітря, очищення повітря HEPA.

Постановка проблеми. Дрібнодисперсні частинки в діапазоні PM2.5 від 5,5 до 119,2 мкг/м³ та PM10 від 4,2 до 215,8 мкг/м³ є основними чинниками респіраторних патологій [1]. PM 2.5 (Particulate Matter 2.5 μm) - це частки розміром до 2,5 мкм, що без перешкод потрапляють в легені при диханні. PM10 – це тверді частинки від 3 до 10 мкм, що осідають на слизових. Ці частинки зазвичай називають пилом – вони містять мінеральні частинки, сажу, краплинки води, аміак - органічні і неорганічні сполуки, що знаходяться у зваженому стані в об'ємі повітря.

Дослідження вказують на те, що 75 % PM2.5, надходять до приміщення з

атмосферним повітрям. А діти проводять 90 % свого часу в приміщенні, що визначає суттєвий вплив складу внутрішнього повітря на їхнє здоров'я [2]. Смертність, пов'язана з атмосферним РМ 2.5, збільшилося з 3,5 млн. в 1990 році до 4,2 млн. осіб у 2015 році [3]. Доведено, що тривалий вплив концентрацій РМ2.5 на рівні – 21,2 мкг/м³ та 17,7 мкг/м³, РМ10 на рівні – 33,47 мкг/м³ та 27,8 мкг/м³ відповідно у м. Київ та Київській області, можуть бути причиною багатьох випадків смертей дорослих та захворюваності на хронічний бронхіт. Частина смертей у м. Київ та Київській області, яка пов'язана з впливом РМ2.5, становить, відповідно: 9,2 та 6,4 % від раку легень; 8,8 та 6,6 % від хронічного обструктивного захворювання легень; 4,9 та 3,7 % від ішемічної хвороби серця; 4,4 та 3,4 % від інсульту. Тривалий вплив РМ10 може призвести до 13,9 % випадків захворюваності на хронічний бронхіт серед дорослих у м. Київ та 8,3 % у Київській області [4].

Застосування портативних повітроочищувачів з високоефективними фільтрами типу HEPA дозволяє забезпечити високу ефективність очищення повітря від часток РМ2.5, РМ10 та вирішити питання підвищення кратності повітрообміну (як додаток до загальнообмінної вентиляції чи як допоміжна система на час ремонту основних систем).

Портативний повітроочищувач – це рециркуляційний пристрій з вентилятором та комбінацією фільтрів різного класу (грубого, тонкого очищення та високоефективними фільтрами типу HEPA), що поєднує в собі низькі показники енергоспоживання та ефективність уловлювання з повітря часток різних фракцій. Повітроочищувач повинен обиратися залежно від вимог індивідуально: вимоги очищення від тютюнового диму, пилу, алергенів від тварин, відбирання забрудників від дихання людини та наявних хімічних сполук у повітрі. Ці вимоги чи їхня комбінація будуть впливати на набір фільтрувальних елементів повітроочищувача. За цією інформацією обирають величину необхідного подавання чистого повітря (Clean Air Delivery Rate CADR); місце розміщення повітроочищувача (розмістити повітроочищувач для вільного переміщення повітряного потоку); продуктивність повітроочищувача за реальними результатами випробувань, проведених надійною третьою організацією [5].

Повітроочищувачі зазвичай складаються з кількох рівнів фільтрів, і визначити ефективність кожного з них практично неможливо через негерметичні з'єднання, кріплення фільтрів до корпусу, і, як наслідок, перетікання повітря від однієї секції фільтра до іншої поза фільтрувальними поверхнями, що лише посилюється при сервісному обслуговуванні, заміні фільтрів та експлуатації установки. Тож, кращим показником якості повітря, що створює повітроочищувач, буде не показник очищення на виході з фільтру, а

показник якості повітря в приміщенні загалом. На якість внутрішнього повітря впливають як параметри стану повітря (температура і відносна вологість), так і осадження часток, швидкість руху повітря, конвекція, наявність джерел постійного чи тимчасового забруднення тощо.

На початку 1980х років американська асоціація АНАМ (Association of Home Appliance Manufacturers) ввела CADR – показник для вимірювання реальної ефективності кімнатних повітроочищувачів. Постає проблема визначення його в реальних умовах, що, як зазначено вище, може відрізнятися від лабораторних значень.

Актуальність дослідження. Для підтримання здоров'я та підвищення тривалості життя необхідна організація безпечного повітряного середовища в місцях постійного перебування людей, особливо за умови, коли рівень насичення частинками РМ 2.5 повітря, що надходить ззовні (інфільтрацією чи системами вентиляції) значно вищий за рекомендовані рівні всесвітньої організації охорони здоров'я (РМ 2.5 – 5 мкг/м³). У системи вентиляції, що проєктуються для громадських та житлових будівель, встановлюються фільтри, які не в змозі затримувати частинки РМ2.5. Будівельними нормами не регламентується встановлення повітроочищувачів у приміщеннях. Швидкий та дієвий спосіб досягнення вимог граничних рівнів забруднення в повітряному середовищі приміщень, а саме РМ2.5, це механічний спосіб фільтрування за допомогою рециркуляційної установки з фільтрувальною вставкою НЕРА. Повітроочищувачі не можуть організовувати повітрообмін як основний тип вентиляції приміщення, але за рахунок забезпечення значних кратностей повітрообміну, які вони можуть створювати, можуть її доповнити, не потребуючи значного споживання енергії, як електричної для роботи вентиляторів, так і енергії на оброблення зовнішнього повітря (нагрівання/охолодження).

Останні дослідження та публікації. Реальний CADR зменшується зі збільшенням розміру часток РМ: для видалення РМ10 кратність повітрообміну буде меншою ніж кратність для видалення РМ2.5. Разом з цим, рекомендований CADR пристроїв очищення повітря для використання в приміщеннях з чутливим населенням або лікарнями має бути вищим, ніж для приміщень загального призначення [6]. Згідно з цією рекомендацією, величини CADR достатньої для зниження забруднення часток РМ2.5 автоматично буде достатньо для очищення від більших фракцій, наприклад РМ10. Тож, це дослідження зосереджене на визначенні CADR повітроочищувача, що є достатнім для очищення повітря від часток РМ2.5 до рівня рекомендованого ВООЗ.

У огляді Szczotko повітроочищувачі показали низьку ефективність очищення повітря. Вони мали РМ-CADR від 46 до 84 % від очікуваного

(CADR_{exp}), що є низьким показником [5]. А в порівняльному дослідженні двох повітроочищувачів Stuti Dubey та ін. ефективність видалення РМ була максимум 64-68%. Разом з тим, у цьому дослідженні рекомендували використовувати очищувачі повітря з механічними фільтрами (HEPA) замість повітроочищувачів, які виділяють іони для очищення повітря (кількість іонів після процесу очищення збільшилась за рахунок роботи самого очисника) [7].

Керуючись цими даними, Sara Bjerre Sørensen [9] та ін. у своєму дослідженні підтвердили невідповідність між очікуваною та експериментально отриманою CADR. Для семи з восьми перевірених очищувачів повітря CADR для всіх перевірених летких органічних сполук (метанол, ацетальдегід, ацетон, оцтова кислота, ізопрен, бутанон, толуол, бензальдегід і лімонен) були значно нижчими, ніж відповідні CADR для РМ. Загалом було виявлено, що ефективність видалення за один прохід для летких органічних сполук зменшується як функція часу. Порівняно з CADR_{exp}, п'ять із восьми протестованих повітроочисників продемонстрували низькі результати щодо видалення твердих частинок, за якими зазвичай оцінюється CADR [8].

Розглянемо формули, які описують теоретичний CADR:

Ефективність повітроочищувача визначається за формулою [9]:

$$E = \frac{N_{\text{вхід.фільтр}} - N_{\text{вихід.фільтр}}}{N_{\text{вхід.фільтр}}} \quad (1)$$

де $N_{\text{вхід.фільтр}}$ та $N_{\text{вихід.фільтр}}$ – концентрація часток на вході та після очищувача.

Тоді показник реальної ефективності повітроочищувача CADR визначається за формулою [10]:

$$CADR = E \cdot L = L \cdot E_{\text{оч.}} - V \cdot E_{\text{осад.}} = L \cdot \frac{N_{\text{вхід.оч.}} - N_{\text{вихід.оч.}}}{N_{\text{вхід.оч.}}} - \frac{V}{t} \cdot \frac{N_{\text{поч.осад.}} - N_{\text{кін.осад.}}}{N_{\text{поч.осад.}}}, \quad \text{м}^3/\text{год} \quad (2)$$

де E – ефективність очищувача; L – продуктивність повітроочисника, м³/год; $E_{\text{оч.}}$ – ефективність очищувача; V – об'єм приміщення, м³, $E_{\text{осад.}}$ – ефективність природного осадження, $N_{\text{поч.оч.}}$ та $N_{\text{кін.оч.}}$ – концентрація часток напочатку та напикінці часу t , год, в приміщенні з повітроочищувачем, $N_{\text{поч.осад.}}$ та $N_{\text{кін.осад.}}$ – те ж без повітроочищувача. Концентрація часток в момент часу визначається за формулою [11]:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{E \cdot L \cdot t}{V}} = N_0 \cdot e^{-\frac{CADR \cdot t}{V}}, \text{ мкг/м}^3, \quad (3)$$

де N_t – концентрація часток у момент часу t , с; N_0 – початкова концентрація часток, мкг/м³, при $t = 0$.

З формули (2) CADR залежить від продуктивності очисника, типу забруднення та концентрації забруднення, від об'єму приміщення та класу фільтруючої вставки або їх комплекту.

Формулювання цілей статті. Даним дослідженням здійснено визначення залежності очищувальної здатності повітроочищувача з фільтрувальною вставкою HEPA від зміни параметрів самої установки та рівнів забруднення повітряного середовища дрібнодисперсними частками PM2.5 в реальних умовах без зміни фізичних параметрів повітряного середовища (сталі температура, вологість та кількість CO₂). Досягнення безпечних рекомендованих ВООЗ рівнів PM2.5 в 5 мкг/м³ при фоновому забрудненні зовнішнього повітря в 16,7 мкг на 1м³. Цілями роботи визначено отримання реального CADR повітроочисника та виявлення його оптимальної продуктивності при кожному з рівнів забруднення, з умовою що очищення повітря не повинно тривати довше ніж 1одна година.

Основна частина. Перевірялася можливість зменшення часу очищення повітря від початкового рівня забруднення до безпечного рівня використовуючи поєднання двох факторів: кількості повітря, що проходить через фільтр, та використання вискоефективного фільтру типу HEPA. Визначення реального CADR повітроочищувача.

Географічне розташування досліду – Київ, Україна (50°27'00"пн.ш.; 30°31'25"сх.д. Це – місто з високим транспортним навантаженням та значним індустріальним забрудненням. Це призводить до погіршення якості зовнішнього повітря та, у свою чергу, впливає на якість повітря в приміщеннях.

Місце проведення досліду: повітроочищувач розташовано в кімнаті площею 20 м² і заввишки до стелі 2,75 м протягом січня 2024 р. Внутрішніх джерел забруднення немає. Вікна закриті. Працює система опалення. Температура повітря 25 °С, відносна вологість 40 %. Рівень CO₂ становить 400-500 ppm. Рівень забруднення PM2.5 у зовнішньому повітрі на час проведення досліду 16,7 мкг/м³.

Для вимірювання використовувалися такі прилади:

- монітор якості повітря AirVisualPro;
- анемометр ET-965;
- гравіметричний відбір проб РМ фракції розміру 2,5–1,0 мкм, проводився за допомогою датчика частинок Particle Scan Lite, IQAir. Serial

nr.:2005.30837. Flow 0,025 cfm у загальному повітрі приміщення з і без роботи очищувача повітря.

Згідно з обмеженням робочого часу датчика, відбір проб проводився протягом шести інтервалів часу від 1 хв до 5 годин.

У цьому дослідженні використовувалися один тип повітроочищувача при двох режимах продуктивності 100 та 310 м³/год та двох варіантах концентрації PM2.5:

- 20 мкг/м³ (індекс якості повітря 2 для PM2.5 (незначний))
- 180 мкг/м³ (індекс якості повітря 10 для PM2.5 (небезпечний)).

Повітроочищувач складався з вентилятора, фільтра G4, фільтра F7 фільтра з активованим вугіллям, фільтра HEPA 11.

Метою дослідження є визначення реальної швидкості подачі чистого повітря повітроочищувачем, його реальну продуктивність, дійсну кількість чистого повітря, що здатен виробити повітроочисник за одиницю часу при визначеному забрудненні цього повітря - його CADR.

Вимір CADR очищувача по PM2.5 проводимо в два етапи: виконуються заміри очищення повітря при двох рівнях забруднення без повітроочищувача (природне осідання). Потім при тих же параметрах (температура, відносна вологість повітря, рівень забруднення) проводимо дослід з повітроочищувачем при двох режимах його продуктивності. Перед кожним дослідом попередньо очищуємо повітря до значення PM2.5 4 мкг/м³. Потім створюємо в кімнаті задану концентрацію часток PM2.5. Проводимо вимірювання зміни концентрації часток в певні моменти часу: від 1хв до 5 годин (табл. 1, рис. 1).

У даному випадку потрібен лише часовий проміжок в 1 годину. Тому отримаємо показники параметрів на даний момент часу і визначимо, які параметри установки дозволили отримати бажані 5 мкм/м³. Скориставшись формулою (2) визначимо CADR для кожного з випадків протягом години роботи повітроочищувача при $V = 55 \text{ м}^3$ (табл. 2).

Отже, очищення повітря в повітроочищувачах є дієвим способом покращення якості повітря в приміщенні з урахуванням всіх вимог їх використання, однак вони не можуть організовувати основний повітрообмін. При збільшенні продуктивності повітроочищувача час очищення повітря зменшується за будь якого рівня забруднення PM2.5.

Розрахункова величина CADR при невеликому забрудненні PM2.5 повинна бути не менше половини продуктивності повітроочищувача для прогнозованої тривалості очищення не більше години. Менша величина CADR призведе до поступового накопичення забруднювачів, що нівелює роботу повітроочищувача.

Таблиця 1. Зміна концентрації часток в повітрі з часовим інтервалом.

Час t, год	Режим очищення					
	Природне осадження	Повітроочишувач продуктивністю, м³/год		Природне осадження	Повітроочишувач продуктивністю, м³/год	
		100	310		100	310
	Початкове забруднення PM2.5, мкг/м³					
	20 (індекс якості повітря 2 – незначний рівень)			180 (індекс якості повітря 10 – небезпечний рівень)		
	PM2.5, мкг/м³					
0	20,0	18,9	20,0	114,0	114,0	115,0
0,25	18,0	16,7	4,0	110,0	96,2	79,2
0,5	17,0	11,0	-	99,0	90,9	19,0
0,75	17,0	7,0	-	96,0	81	9,0
1	15,0	5,0	-	93,0	78,3	5
2	11,0	-	-	55,0	36,0	4
3	9,0	-	-	45,0	21,0	-
4	6,0	-	-	29,0	12,0	-
5	5,0	-	-	19,0	5,0	-

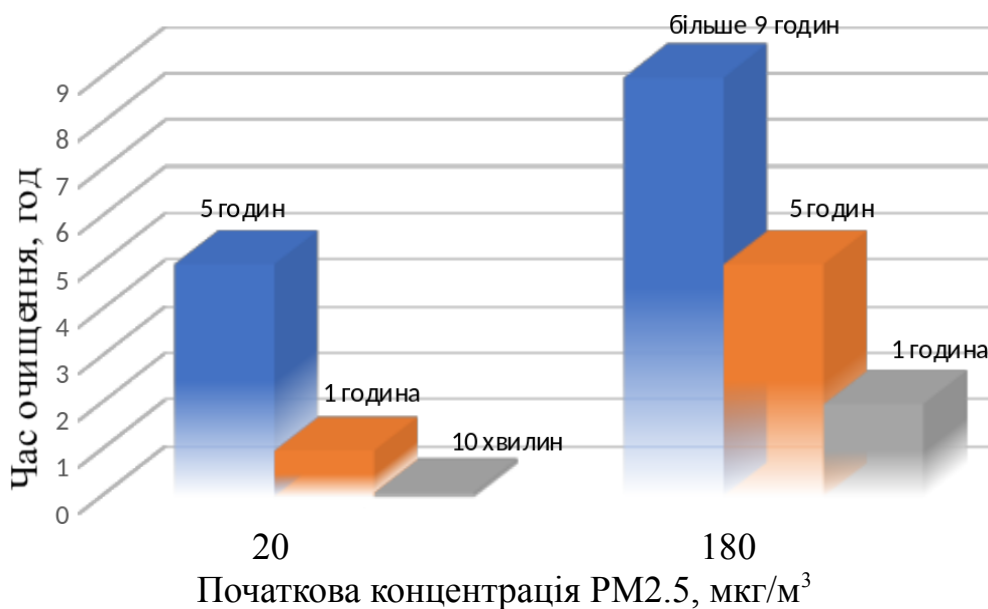


Рис. 1. Час очищення повітря до рівня PM2.5 5 мкг/м³:

■ – лише природне осадження; ■ – працює повітроочишувач, 100 м³/год;
■ – те ж 310 м³/год

Таблиця 2. Зміну концентрації часток в повітрі з часовим інтервалом.

Рівень забруднення PM2.5, мкг/м ³	Продуктивність <i>L</i> , м ³ /год	Ефективність повітроочищувача, %	Коефіцієнт осідання часток	CADR,		Кратність повітрообміну, год ⁻¹
				м ³ /год	год ⁻¹	
20	100	73	25	59	1,1	1,8
	310	80	25	234	4,3	5,6
180	100	31	18	21	0,4	1,8
	310	94	18	282	5,1	5,6

При незначному забрудненні PM2.5 20 мкг/м³ у житлових та офісних приміщеннях достатньо, щоб величина кратності повітрообміну становила біля двох, при цьому CADR повітроочисника дорівнював 59 % продуктивності пристрою з урахуванням природного осадження часток (при $L = 100$ м³/год величина CADR=59 м³/год при ефективності фільтрувальних вставок в 73 % та природному осадженні часток 25 %); при значному забрудненні PM2.5 = 180 мкг/м³ в житлових та офісних приміщеннях необхідною кратністю повітрообміну є шестикратний повітрообмін, з високою інтенсивністю повітрообміну (перемішуванням повітряного середовища) та високою ефективністю фільтра. При цьому CADR повітроочисника становив 91 % продуктивності пристрою з урахуванням природного осадження часток. При $L = 310$ м³/год величина CADR становить 59 м³/год при ефективності фільтрувальних вставок в 94 % та природньому осадженні часток 18 %. Інші параметри не відповідали тривалості очищення в 1 годину та значно перевищували його.

Також, із даних які отримано в досліді, можна зробити висновок, що процес природного осадження та величина зовнішнього забруднення не дозволяють очистити повітря без використання механічної фільтрації при будь якому з вказаних в дослідженні забруднень PM2.5. Шляхом природнього осідання на архітектурних поверхнях кімнати осіло від 18 до 25 % PM2.5, але кожного разу при утворенні будь яких достатньо швидких повітряних потоків (системи вентиляції, протяги чи навіть ходи людини приміщенням) забруднення можуть повернутися в повітряне середовище.

Висновки. Очищення повітря в повітроочищувачах є дієвим способом покращення якості повітря в приміщенні з урахуванням всіх вимог їх використання, однак вони не можуть організовувати основний повітрообмін. При збільшенні продуктивності повітроочищувача – час очищення повітря зменшується. Розрахункова величина CADR при невеликому забрудненні PM2.5 повинна бути не менше половини продуктивності повітроочищувача. При незначному забрудненні PM2.5 20 мкг/м³ у житлових та офісних приміщеннях

достатньо щоб величина кратності повітрообміну становила б біля двох, при цьому CADR повітроочисника дорівнював 59% продуктивності пристрою з урахуванням природного осадження часток. При значному забрудненні PM_{2.5} 180 мкг/м³ необхідною кратністю повітрообміну є шість. При цьому потрібна висока інтенсивність повітрообміну (перемішування повітряного середовища) та ефективність фільтра. CADR повітроочисника становив 91% продуктивності пристрою з урахуванням природного осадження часток. Природне осадження та величина зовнішнього забруднення не дозволяють очистити повітря без використання механічної фільтрації.

Перспективи подальших досліджень. Необхідні подальші дослідження для визначення CADR при роботі рециркуляційного агрегату з фільтрувальною вставкою типу HEPA при роботі систем вентиляції, кондиціонування повітря та наявності інших забруднювачів у приміщенні в наших кліматичних умовах.

Подяки. Роботу виконано за сприяння виробничих та апаратних потужностей ТОВ "ІСК АКСОН" в особі Ігора Кліндюка та консультативного супроводу Сергія Пендели.

References

1. Kovalchuk M.P. Scientific substantiation of measures for prevention of negative influence of atmospheric air on the incidence of bronchial asthma in children of Kyiv. Manuscript. Diss. State Institution «O.M. Marzieiev Institute for Public Health, National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, 2021. <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0421U000101/> (in Ukrainian)
2. Karoline K. Johnson. Evaluating Air Pollutant Exposure and the Impacts of Indoor Air Filtration Using LowCost Monitors. Diss. Department of Civil and Environmental Engineering in the Graduate School of Duke University 2018. <https://hdl.handle.net/10161/18279>
3. Cohen A.J., Brauer, M., Burnett, R., et al. 2017. "Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015." The Lancet, vol. 389, iss. 10082, 2017 P.1907–1918. [https://doi.org/10.1016%2FS0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016%2FS0140-6736(17)30505-6)
4. Maremukha T.P. Hihienichna otsinka zabrudnennia atmosferneho povitria teploenerhetychnymy ob'ektamy. Diss. «Instytut hromadskoho zdorovia im. O.M. Marzieieva NAMN Ukrainy», Kyiv, 2020. (in Ukrainian) <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0421U000058/>
5. Szczotko M., Orych I., Mąka Ł., Solecka J. A review of selected types of indoor air purifiers in terms of microbial air contamination reduction. Atmosphere, vol. 13, iss. 5, 2022, p. 800, <https://doi.org/10.3390/atmos13050800>
6. Kwang-Chul Noh, Myung-Do Oh. Variation of clean air delivery rate and effective air cleaning ratio of room air cleaning devices. Building and Environment,

vol. 84, 2015, pp. 44-49. . <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.031>.

7. Dubey S., Rohra H., Tanejaa A. Assessing effectiveness of air purifiers (HEPA) for controlling indoor particulate pollution. Heliyon, vol. 7, iss. 9, 2021, p. e07976. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07976>

8. Sørensen S. B., Feilberg F., Kristensen K. Removal of volatile organic compounds by mobile air cleaners: Dynamics, limitations, and possible side effects. Building and Environment, vol. 242, 2023, pp. 44-49 . <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110541>

9. USEPA, Unfinished Business: A Comparative Assessment of Environmental Problems Appendix II Non-cancer Risk Work Group, 1987. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000BZVE.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986+Thru+1990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C86thru90%5CTxt%5C00000001%5C2000BZVE.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> Access date: 23 November 2024

10. Klepeis N.E., Nelson W.C., Ott W.R., Robinson J.P., Tsang A.M., Switzer P., Behar J.V., Hern S.C., Engelmann W.H. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. Journal of exposure science & environmental epidemiology, vol. 11, iss 3, 2001, pp. 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>.

11. Stephens B., Gall E.T., Heidarinejad M., Farmer D.K. Interpreting Air Cleaner Performance Data. ASHRAE Journal, April 2022, p. 20-30, https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/20-31_stephens.pdf

UDC 697.941+697.98

Postgraduate Student. **Luibov Makarenko**,
2222555@ukr.net, ORCID: 0009-0005-9024-8521,
Dr Hab., Prof. **Oleksandr Pryimak**,
02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

EFFECTIVENESS OF THE RECIRCULATION AIR CLEANER IN REAL CONDITIONS AT VARIATION OF THE AIR FLOW AND PM_{2.5} CONTENT.

Abstract. *Technical data on the effectiveness of air purifiers are usually obtained in laboratory conditions in special aerosol stands with test chambers or boxes of a small volume, while in real conditions the purifiers are used in rooms with a volume of at least 40-60 m³ with a permanent presence of people (distribution respiratory diseases emitted with breathing) and entry of PM_{2.5}..PM₁₀ particles into the room from working equipment (printers, chargers, power tools, etc.). There are already enough scientific materials on this matter, which prove that the actual efficiency of air purifiers in real conditions is much lower than the data given by the manufacturers. Therefore, there is a need to determine the optimal performance of the air purifier in real conditions in order to achieve the WHO recommended levels of safe indoor pollution with a maximum time interval of 1 hour, besides, taking into account that the air outside has a higher level of pollution with particles of PM 2.5. In this study, we strive to obtain a PM 2.5 value of 5 µg/m³ with a PM_{2.5} level in the air outside of 16.7 µg/m³. The calculated value of CADR for light pollution should be at least half of the power of the air purifier for the projected cleaning duration of no more than 1 hour. A smaller value of CADR leads to further accumulation of pollutants, which reduces the work of the cleaner. In this study, the value of CADR was at L=100 m³/hour the value of CADR= 59 m³/hour with the efficiency of filter inserts in 73% and natural sedimentation of particles in 25%, and at L=310 m³/hour the value of CADR= 59 m³/hour at efficiency of filter inserts in 94% and natural sedimentation of particles in 18%. The process of natural deposition and the amount of external pollution do not allow to clean the air without the use of mechanical filtration for any of the pollutants specified in the study.*

Keywords: *air exchange rate, CADR, mechanical air filtration, air purification, HEPA filter.*

УДК 696.2

доцент **Юрій Франчук**,

franchuk.yy@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7910-8705

доцентка **Вікторія Коновалюк**

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

Київський національний університет будівництва і архітектури

ВИКОРИСТАННЯ БІОМЕТАНУ І ВОДНЮ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

***Анотація.** У статті проведено аналіз складу та якості природного газу відповідно вимог нормативних документів до газу, що транспортується в мережах газопостачання, та до газових сумішей, що можуть бути використанні у двигунах внутрішнього згоряння. Проведено порівняння інформації щодо складу та якості газу, що передбачена в різних нормативних документах з інформацією отриманою в результаті проведених досліджень взятих проб газу в газовій мережі. Запропонована методика дозволяє розрахувати склад газу який максимально використовуватиме відновлювальні джерела енергії (біогаз, водень). Утворена при цьому суміш буде відповідати нормативним вимогам щодо якості газу для двигунів внутрішнього згоряння, тобто вимогам ДСТУ ГОСТ 27577:2005. Рекомендовано доочищення мережевого газового палива та зменшення вмісту твердих частин, рідких фракцій і сірки до нормативних значень.*

***Ключові слова:** природний газ, якість газу, двигун внутрішнього згоряння, теплота згоряння, склад газу.*

Вступ. В останні п'ять років споживання природного газу в Україні становило біля 30 млрд. м³. Використання газу у 2022 році у зв'язку з широкомасштабним вторгненням росії зменшилось до 25 млрд м³. Природний газ крім традиційного використання в промисловості та житловому секторі все більше використовується в транспорті. Використання газу продукує на 80 % менше шкідливих викидів та забезпечує на 40-50 % економії витрат порівняно з нафтопродуктами.

На сьогодні в Україні налічується більше 300 заправок стисненого природного газу. При зростанні попиту на стиснений газ цього стає замало. Проте розгалужена газотранспортна система України має потенціал для розширення мережі заправокних станцій. Необхідна інфраструктура заправокних станцій на метані може бути створена в будь-якому місті, де є доступ до газотранспортної мережі, серед іншого біля важливих автострад.

Актуальність дослідження. Країни Європейського Союзу все ширше

використовують газ на транспорті. Згідно з Директивою Європейського Союзу щодо розвитку інфраструктури з альтернативних видів палива, європейські країни мають забезпечити доступність у радіусі 150 км електро-, метанових та водневих заправок. Тобто стратегія енергетичного переходу у сфері транспорту закріплена на законодавчому рівні.

Верховна Рада України схвалила законопроект № 8172, який має на меті сприяти розвитку екологічно чистого громадського транспорту. Закон накладає обмеження на закупівлю та експлуатування дизельних та бензинових автобусів у громадському транспорті. З 2036 року на міських автобусних маршрутах буде дозволено використовувати транспорт, що обладнаний водневими паливними елементами, або транспортні засоби, які працюють на газі. За прогнозами експертів, до 2030 року близько 25 % всього громадського транспорту у великих містах України становитимуть електричні або газові автобуси, а до 2033 року їхня частка має подвоїтися.

З урахуванням стану війни з росією, частого порушення електро- та енергопостачання, відбудови та розбудови економіки України потреба у використанні пересувних пристроїв, що індивідуально виробляють енергію, зростає.

Останні дослідження та публікації. Вимоги до складу та якості стисненого природного газу для двигунів внутрішнього згоряння викладено в [1]. Питання використання природного газу відображено в нормативних документах[2-7].

У монографії [8] розглянуто актуальність використання стиснутого природного газу як палива для автотракторної техніки та проаналізовано способи переобладнання дизелів для роботи на стиснутому природному газі. У роботі [9] стверджується, що використання альтернативних палив, зокрема стисненого природного газу, дизельного біопалива рослинного чи тваринного походження тощо, дозволить значно розширити паливну базу дизельних автотранспортних засобів та не потребує значної зміни їхньої конструкції. У роботі [10] визначено, що основними замінниками традиційного нафтового палива може бути газове паливо, яке за своїми властивостям подібне до бензину. Проведений аналіз показав, що газове паливо перевершує бензин як за експлуатаційними, так і за екологічними показниками, а вартість необхідного газового палива нижче вартості бензину. Це загалом підтверджує доцільність переведення автомобільного парку на газове паливо. Аналіз складу газу, що міститься в газотранспортній мережі, показав наявність значних кількостей домішок [11]. Ці домішки обмежують можливості використання мережевого газу у двигунах внутрішнього згоряння.

Формулювання цілей статті. Для визначення потенційних можливостей

використання мережевого газу для спалювання у двигунах внутрішнього згоряння необхідно проаналізувати фізико-хімічні показники газу різного походження.

Основна частина. Газоподібне паливо є основною складовою паливного балансу України. Разом з активним використанням газу в промисловості, сільському господарстві, житловому і комунальному секторах, газоподібне паливо має перспективи використання і у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Газоподібне паливо із транспортних магістральних трубопроводів поступає на газорозподільні станції та після відповідного підготовлення газопроводами постачається споживачам, як у промисловості, житлово-комунальному секторі, так і на заправки автомобілів. Газ, яким заправляються автомобілі, має відповідати вимогам ДСТУ ГОСТ 27577:2005 [1], які наведено в табл.1.

Таблиця 1. Основні вимоги до якості газу для двигунів внутрішнього згоряння [1]

№ з/п	Назва показника	Значення
1	Об'ємна теплота згоряння нижча, МДж/м ³ , не менше	31,8
2	Відносна густина до повітря	0,55-0,70
3	Розрахункове октанове число (по моторному методу), не менше	105
4	Концентрація сірководню, г/м ³ , не більше	0,02
5	Концентрація меркаптанової сірки, г/м ³ , не більше	0,036
6	Маса механічних домішок в 1 м ³ , не більше	1,0
7	Сумарна об'ємна доля негорючих компонентів, %, не більше	7,0
8	Об'ємна доля кисню, %, не більше	1,0
9	Концентрація парів води, мг/м ³ , не більше	9,0

Основними горючими компонентами газоподібного палива є метан (CH₄), та газоподібні вуглеводні: етан (C₂H₆), бутан (C₄H₁₀) і водень (H₂). Склад та якість газу, що транспортується газовими мережами, визначається вимогами Кодексу газотранспортної системи (ГТС) [3] та Технічного Регламенту газу [5] (табл. 2 і 3), а його склад відображається в паспорті газу який надає Оператор газу згідно з вимогами Кодексу ГТС.

У результаті порівняння нормативних вимог до якості газу для ДВЗ [1] з нормативними вимогами Кодексу ГТС [2] можна виділити наступне:

- значення теплоти згоряння для мережевого газу повинно знаходитися в діапазоні 32,66-34,54 МДж/м³, а для ДВЗ вимоги є менш жорсткими (не менше 31,8 МДж/м³);

Таблиця 2. Основні вимоги до складу газу в газотранспортній системі згідно вимог Кодексу ГТС

№ з/п	Назва показника	Значення
1	вміст метану, мол. %	мінімум 90
2	вміст етану, мол. %	максимум 7
3	вміст пропану, мол. %	максимум 3
4	вміст бутану, мол. %	максимум 2
5	вміст пентану та більш важких вуглеводнів, мол. %	максимум 1
6	вміст азоту, мол. %	максимум 5
7	вміст вуглецю, мол. %	максимум 2
8	вміст кисню, мол. %	максимум 0,2
9	нижча теплота згоряння (25 °C/20 °C) мінімум, МДж/м ³ (кВт·год/м ³) максимум, МДж/м ³ (кВт·год/м ³)	32,66 (09,07) 34,54 (09,59)
10	температура точки роси за вологою °C при абсолютному тиску газу 3,92 МПа	не перевищує мінус 8 (-8)
11	температура точки роси за вуглеводнями при температурі газу не нижче 0 °C	не перевищує 0°C
12	вміст механічних домішок:	відсутні
13	вміст сірководню, г/м ³	максимум 0,006
14	вміст меркаптанової сірки, г/м ³	максимум 0,02

Таблиця 3. Вимоги до показників якості природного газу згідно Технічного Регламенту

Показник якості	Одиниця вимірювання	Нормативне значення	
		мінімальне	максимальне
Відносна густина ¹	—	0,555	0,700 (0,750)
Масова концентрація механічних домішок	мг/м ³	не застосовується	1
¹ Максимальне нормативне значення діє з 01.01.2025 року. До 01.01.2025 року діє нормативне значення, наведене в дужках.			

- об'ємна частка кисню обмежена 0,2 % для мережевого газу та 1 % для ДВЗ.
- для ДВЗ не лімітується значення числа Воббе, але є обмеження щодо розрахункового октанового числа;

- відносна густина, що лімітована для ДВЗ для природного газу, нормується тільки в проєкті Технічного регламенту.

Паспорти фізико-хімічних показників природного газу підлягають оприлюдненню на вебсайті оператора газотранспортної системи.

Оперативні дані наводяться за узгодженими точками та містять чисельні значення:

- густини газу;
- вмісту метану, азоту, вуглекислого газу;
- температуру точки роси за вологою та за вуглеводнями;
- число Воббе;
- середньозважену вищу теплоту згоряння за звітний період.

У роботі [9] проведені дослідження показали, що газ у міських розподільних мережах містить 30...50 % вуглеводневого конденсату, 40...70 % пластової води, 5...15 % механічних домішок, 3...6 % мінеральних солей, 0,5...1,2 % продуктів корозії. Причинами наявності забруднень є незадовільне очищення внутрішньої порожнини трубопроводу після його будівництва перед введенням в експлуатацію і недосконале підготовлення газу на установках комплексного підготовлення газу на промислах.

Наявність сірководню H_2S , викликає корозійний знос газової апаратури та деталей двигуна. Смоляні сполуки призводять до абразивного зносу циліндропоршневої групи, зниження компресії двигуна та зміни в'язкості двигунної оливи.

При використанні мережевого газу як палива для двигунів внутрішнього згоряння викликає стурбованість щодо можливого вмісту в наявному газі забруднень. Перелічені негативні фактори вплинуть на активне абразивне зношення циліндропоршневої групи двигуна, зменшення компресії і потужності. Використання непередбачених важких фракцій призведе до неповного згоряння, надходження їх у піддон двигуна, зміни в'язкості оливи та, в кінцевому рахунку, як і в першому випадку, до передчасного виходу з ладу двигуна та потреби його ремонту. Для запобігання описаним процесам потрібно додаткову увагу приділяти якості газу та додатково контролювати забрудненість і стан двигунної оливи.

Раніше вимога до мольної частки кисню у природному газі, що подається до ГТС чи газорозподільної мережі, була на рівні не більше 0,02 %. Наразі частка збільшується до 0,2 % для подавання біометану до ГТС і до 1,0 % - для подавання біометану до ГТС.

Для прийняття технічного рішення щодо можливості використання мережевого газу у ДВЗ необхідно визначити відповідність отриманої газової суміші нормативним вимогам для даного обладнання. Згідно з вимогами

ДСТУ 27577-2008 «Газ природній» для двигунів встановлено дев'ять показників якості газу. У вимогах відсутнє нормування числа Воббе, а теплота згоряння знижена до 31,8 МДж/м³.

Вимоги можна описати виразом

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{n1}^p \cdot r_1 + Q_{n2}^p \cdot r_2 + \dots + Q_{nn}^p \cdot r_n \geq 31,8, \\ 0,55 \leq \rho_1 \cdot r_1 + \rho_2 \cdot r_2 + \dots + \rho_n \cdot r_n \leq 0,7, \\ O_1 \cdot r_1 + O_2 \cdot r_2 + O_n \cdot r_n \geq 105, \\ r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1 \end{array} \right. , \quad (1)$$

де Q_{ni}^p – нижча теплота згоряння i -го компонента суміші, МДж/м³; ρ_i – густина i -го компонента суміші, кг/м³; O_i – октанове число i -го компонента суміші; r_i – об'ємна концентрація i -го компонента; n – кількість компонентів.

Прийнявши суміш 80 % метану, 10 % водню та 10 % біогазу маємо:

- теплоту згоряння $35,76 \cdot 0,8 + 10,83 \cdot 0,1 + 23 \cdot 0,1 = 31,99$ МДж.
- октанове число $110 \cdot 0,8 + 114 \cdot 0,1 + 129 \cdot 0,1 = 111,4$.
- густину $0,7168 \cdot 0,8 + 0,0899 \cdot 0,1 + 1,2 \cdot 0,1 = 0,69$ кг/м³.

Газ відповідає вимогам до палива ДВС.

Висновок. Запропонована методика оцінювання складу паливного газу для двигунів дозволяє визначити допустиму кількість біогазу, водню тощо для використання відновлювальних джерел енергії, наприклад, 80 % метану, 10 % водню та 10 % біогазу відповідає вимогам нормативних документів щодо меж теплоти згорання, октанового числа та густини. З урахуванням тенденції збільшення використання газу, особливо біометану, використання газових сумішей у двигунах внутрішнього згорання підлягає подальшого вивчення.

References

1. Haz pryrodnyi palyvnyi komprymovannyi dlia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia. Tekhnichni umovy DSTU 27577:2005 (HOST 27577-2000, IDT), Derzhspozhyvstandart, 2005 (in Ukrainian)
2. Pravyla bezpeky system hazopostachannia. NPAOP 0.00-1.76-15. Osnova, 2015 (in Ukrainian)
3. Kodeks hazotransportnoi systemy. Postanova NKRE № 2493, 30.09.2015 <https://ips.ligazakon.net/document/re27823> (in Ukrainian)
4. Kodeks hazorozpodilnykh system. Ofitsiyni visnyk Ukrainy, № 92,

- 27.11.2015, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text>. (in Ukrainian)
5. Proiekt tekhnichnoho rehlamentu pryrodnoho hazu. 2019. <http://www.drs.gov.ua/wp-content/uploads/2019/05/4291> (in Ukrainian)
6. Pravyla okhorony pratsi pid chas ekspluatatsii obladnannia, shcho pratsiuie pid tyskom. NPAOP 0.00-1.81-18. https://dnaop.com/html/54590/doc-NPAOP_0.00-1.81-187 (in Ukrainian)
7. Pravyla okhorony pratsi na avtomobilnomu transporti. NPAOP 0.00-1.62-12. https://dnaop.com/html/32443/doc-NPAOP_0.00-1.62-12 (in Ukrainian)
8. Zakharchuk O.V. Vykorystannia hazovoho palyva v avtotraktornii tekhnitsi. RVV Luts'koho NTU, 2016. (in Ukrainian)
9. Kovbasenko S.V. "Mozhlyvosti pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky transportnykh zasobiv z dyzeliamy zastosuvanniam alternatyvnykh palyv." Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, No2(16), 2022, pp. 51–57. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-51-57> (in Ukrainian)
10. Dobrovolskyi O.S., Stupak N.S. "Dotsilnist perevedennia avtomobilnoho parku na hazove palyvo." Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, № 1 (37), 2017. pp. 124-132. <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/124.pdf> (in Ukrainian)
11. Kaptsova N. I. Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii ta remontu miskykh hazoprovodiv. Diss. abstract. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2018. <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0418U002881/> (in Ukrainian)

associate professor **Yurii Franchuk**,
franchuk.yy@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7910-8705
assistant **Viktoriia Konovaliuk**,
konovaliuk.va@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5115-7188
Kyiv National University of Construction and Architecture

USE OF BIOMETHANE AND HYDROGEN IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Abstract. *Over the past five years, natural gas consumption in Ukraine has been around 30 billion m³. In 2022, gas consumption is decreased to 25 billion m³ due to Russia's invasion. In addition to its traditional use in industry and the residential sector, natural gas is increasingly used in transportation. The use of gas produces 80 % less harmful emissions and provides 40...50 % cost savings compared to oil products. The European Union countries are increasingly using gas in*

transport. According to the European Union's Directive on the development of alternative fuels infrastructure, European countries must ensure the availability of electric, methane and hydrogen filling stations within a radius of 150 km. This means that the strategy of energy transition in the transportation sector is enshrined in law. The Verkhovna Rada of Ukraine has approved draft law No. 8172, which aims to promote the development of environment-friendly public transport. The law imposes restrictions on the purchase and operation of diesel and gasoline buses in public transport. The article analyses the composition and quality of natural gas in accordance with the requirements of regulatory documents for gas transported in gas supply networks and for gas mixtures that can be used in internal combustion engines. The information on the composition and quality of gas provided for in various regulatory documents was compared with the information obtained as a result of the studies of gas samples taken in the gas network. The proposed methodology allows us to calculate the composition of gas that will maximize the use of renewable energy sources (biogas, hydrogen). The resulting mixture will meet the regulatory requirements for gas quality for internal combustion engines, i.e. the requirements of DSTU GOST 27577:2005. It is recommended to additionally purify the network gas fuel and reduce the content of solid parts, liquid fractions, and sulfur to the standard values.

Key words: natural gas, gas quality, internal combustion engines, calorific value, gas composition

УДК 697. 644.1

Аспірант, асистент. Андрій Бондаренко,
bondarenko.andrii@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4531-2556,

доцент Євгеній Юрченко,
yel@mail.pgasa.dp.ua, ORCID: 0000-0002-9356-3261,

доцент. Олена Коваль,
koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7805-6811,

студент Артем Коваль,
22230-eeb.koval@365.pdaba.edu.ua

“Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”,
вул. Архітектора Олега Петрова , 24-а, Дніпро 49005, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ БУДІВЕЛЬ

Анотація. Повітропроникність будівлі визначає рівень її енергоефективності. Країни Європейського Союзу наближаються до стандартів NZEB та стандартів пасивного будинку.. Українська нормативна база герметичності будівель не відповідає європейським стандартам енергоефективних будівель і потребує оновлення. Зокрема це стосується розрахунку повітропроникності будівель, та підвищення вимог до нормативно допустимого значення повітропроникності та енергоефективності будівель. Повітропроникність, виражається величиною q_{50} витікання повітря в $\text{м}^3/(\text{год}\cdot\text{м}^2)$ на квадратний метр площі зовнішньої оболонки будинку при дії на будівлю перепаду тиску внутрішнього повітря в 50 Па. Повітропроникність будівель потрібно розраховувати за параметром q_{50} замість кратності повітрообміну n_{50} . Майже всі країни ЄС використовують у своїх нормативах параметр q_{50} . Винятками є Литва та Україна, де розрахунок фактичної повітропроникності ведеться за параметром n_{50} . У статті проаналізовано нормативні документи країн ЄС, порівняно вимоги до повітропроникності будівель із вимогами Українських нормативів та рекомендовано перейняти досвід країн ЄС.

Ключові слова: енергоефективність, повітропроникність, міжнародний стандарт, методика, BlowDoor, герметичність, NZEB, пасивний будинок.

Вступ. Важливішим параметром, який впливає на комфорт в будинку та ефективне використання енергії, є повітропроникність. Повітропроникність, виражається величиною витікання повітря в $\text{м}^3/(\text{год}\cdot\text{м}^2)$ на квадратний метр площі зовнішньої оболонки будинку при дії на будівлю перепаду тиску між внутрішнім і зовнішнім повітрям в 50 Па.

Актуальність дослідження. Перехід на більш точний метод розрахунку повітропроникності та енергоефективності будівлі дозволить правильно визначати енергетичну ефективність будівлі.

Останні дослідження та публікації. У статті [1], проаналізовано порядок розрахунку повітропроникності за параметром n_{50} , год⁻¹. Дана ж стаття пояснює фізичний зміст параметрів n_{50} , год⁻¹, та q_{50} , м³/(год·м²), та доводить доцільність використання саме параметру q_{50} .

У нормативних документах більшості країн ЄС, зокрема Естонія, Фінляндія, Німеччина, Великобританія, Ірландія, затверджено параметр q_{50} . В Українських та Литовських нормативах залишається параметр n_{50} , год⁻¹ (табл. 1, рис. 1).

Усі нормативні документи європейських країн створені на основі на міжнародного стандарту ISO 9972:2015 [2]. Цей стандарт встановлює метод вимірювання повітропроникності будівель або частин будівель у стандартних умовах. Стандарт визначає застосування позитивного або негативного тиску, що механічно створюється в будівлях або в частинах будівлі. Стандарт визначає способи вимірювання витрати повітря залежно від різних перепадів статичного тиску в будівлі та зовні будівлі.

Цей стандарт призначений для застосування при визначенні повітропроникності в одній зоні будівлі. Відповідно до цього стандарту, при необхідності визначення повітропроникності в декількох зонах будівлі може бути використаний принцип однієї зони за умови відкриття внутрішніх дверей або створення рівного тиску у суміжних зонах.

Стандарт визначає фізичний зміст параметрів n_{50} і q_{50} . Параметр n_{50} – це величина, значення якої показує, скільки разів протягом години повітря у приміщенні повністю замінюється на нове [2]:

$$n_{50} = Q / V_{\text{прим}}, \text{ год}^{-1}, \quad (1)$$

де Q – виміряна витрата повітря [м³/год]; $V_{\text{прим}}$ – опалюваний об'єм приміщень [м³]. Насправді коли кажуть про повну заміну повітря на нове, мають на увазі подавання та видалення об'єму повітря, рівне об'єму приміщення. Повної заміни повітря при цьому не відбувається, адже припливне повітря перемішується з повітрям приміщення, а видаляється ця суміш.

Параметр q_{50} – це здатність матеріалів і конструкцій пропускати повітря під впливом перепаду тиску [3]:

$$q_{50} = Q / S_{\text{ок}}, \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2) \text{ або м/год}, \quad (2)$$

Таблиця 1. Нормативні значення повітропроникності в країнах ЄС

Країна	Норматив	q_{50} , $\text{м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$	n_{50} , год^{-1}
Латвія	LBN002-15	<1,5	–
Литва	STR 2.01.02:2016	–	<1,0
Естонія	RKAS	<1,0	–
Польща	Building Codes 2014 EnEv	– <2,5	<1,5 –
Чехія	з механічною вентиляцією з рекуперацією	<1,5 <1,0	– –
Німеччина	DGNB (Target)	<2,5	–
Великобританія	BREEAM ATTMA	<2,5	–
Україна	ДБН В.2.6-31: 2021	–	<2,0
Пасивні будинки		<0,6	–

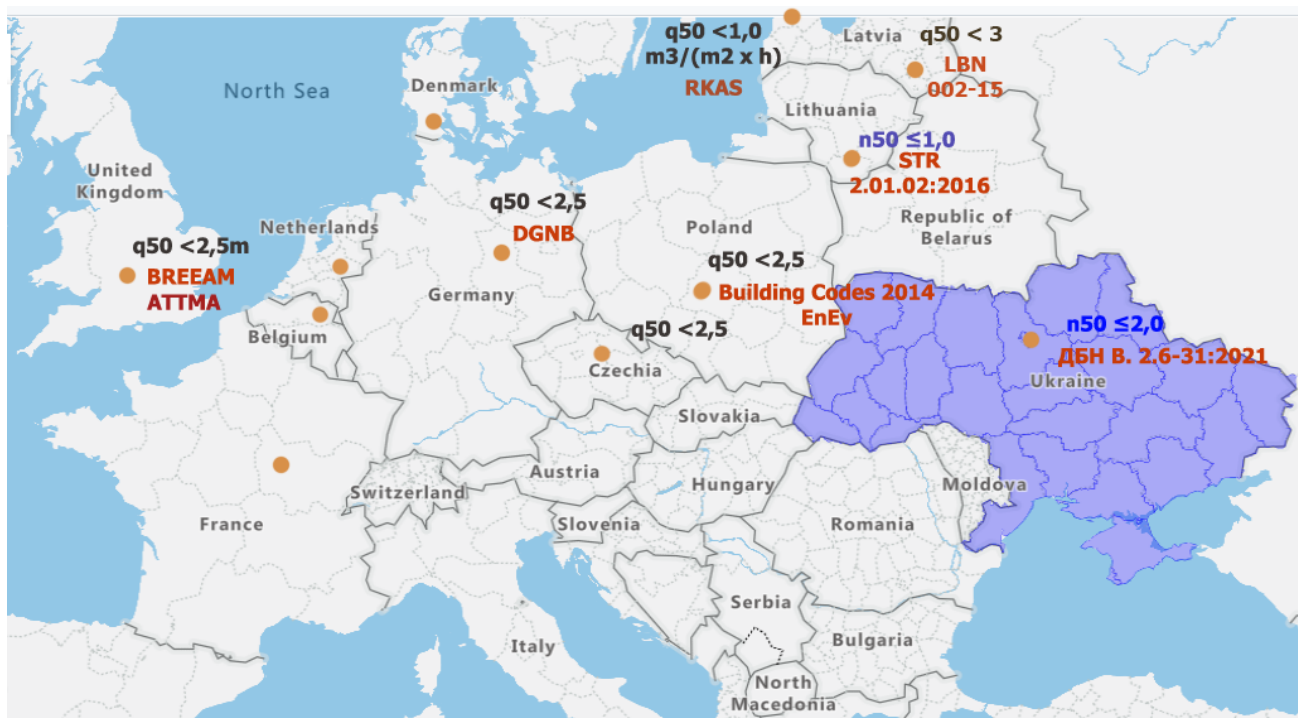


Рис. 1. Використання параметрів n_{50} і q_{50} у країнах ЄС

де $S_{ок}$ – площа огорожувальних конструкцій, м^2 .

Опалюваний об'єм будівлі – фактичний, заміряний зсередини об'єм будівлі, який опалюється, тобто об'єм без урахування холодного горища, та холодного підвалу. Для будівлі у формі прямокутного паралелепіпеда з опалюваним об'ємом розмірами $b \times \ell \times H$, м,

$$V = b \cdot \ell \cdot H, \text{ м}^3 \quad (3)$$

Площа огорожувальних конструкцій $S_{ок}$ м² – загальна площа всіх зовнішніх огорожувальних конструкцій, зовнішніх стін, підлоги, покрівлі або горіщного перекриття.

Рекомендується використовувати параметр q_{50} , особливо для будівель із опалювальним об'ємом більше ніж 1200 м³. Параметр повітропроникності характеризується величиною витрати повітря або газу [м³/год], яке проходить через площу огорожувальних конструкцій [м²]. Так само коефіцієнт теплопередачі U , Вт/(м²·К), показує умови проходження теплоти крізь різні огорожувальні конструкції [2].

Параметр n_{50} , який характеризується відношенням витрати повітря або газу [м³/год], до опалювального об'єму будівлі [м³], не передбачає оцінювання стану зовнішніх огорожувальних конструкцій, і є відносним параметром, який виражається тільки як кратність повітрообміну [9].

Майже всі країни ЄС використовують у своїх нормативах параметр q_{50} . Винятком є Литва та Україна, де розрахунок фактичної повітропроникності ведеться за параметром n_{50} . За таблицею 1 нормативних значень повітропроникності найвище допустиме значення величини повітропроникності $q_{50} < 2,5$ м³/(год·м²), у Латвії та Чехії допустиме значення величини повітропроникності $q_{50} < 1,5$ м³/(год·м²), у більш північній Естонії та Фінляндії $q_{50} < 1,0$ м³/(год·м²). Нормативне значення повітропроникності для пасивних будинків $q_{50} < 0,6$ м³/(год·м²) [4-9].

Згідно з українським нормативом повітропроникності [10], повітропроникність визначається за n_{50} . Для класу енергоефективності С допускається значення $n_{50} < 2,0$ год⁻¹. Для більшості будинків це відповідає орієнтовно $q_{50} < 5$ м³/(год·м²) (рис. 2). За нормативом Литви, який також передбачує використання n_{50} , встановлено $n_{50} < 1,0$ год⁻¹, що орієнтовно відповідає $q_{50} < 2,5$ год⁻¹.

Мета роботи: проаналізувати державні норми повітропроникності країн ЄС, Довести доцільність використання параметру q_{50} замість n_{50} , дати рекомендації щодо внесення змін до нормативів України, зокрема перехід на визначення повітропроникності через параметр q_{50} , визначити максимальне значення нормативного показника повітропроникності будівель.

Основна частина. Проаналізовано звіти тестів повітропроникності 24-х об'єктів різних опалювальних об'ємів і класів енергоефективності. На рис. 2 зображено графік залежності параметрів q_{50} та n_{50} від опалюваного об'єму. Графік розділено по класам герметичності, окремо класи А, В, С та класи D, Е, F. У статті залежність розглядається в рамках певного класу енергоефективності.

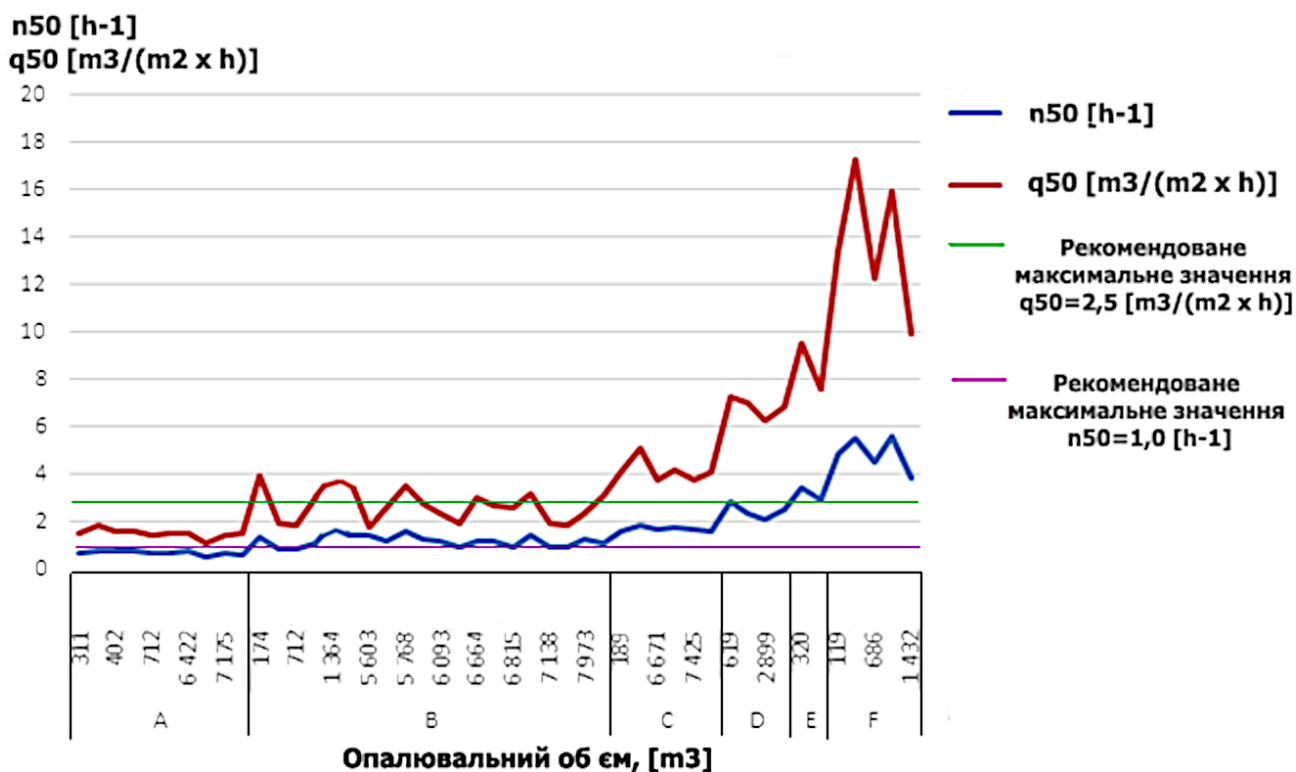


Рис. 2 Графік залежності n_{50} та q_{50} від об'єму з урахуванням класів енергоефективності

Адже тестовані будівлі мають різний теплотехнічний стан – від будівель які відповідають стандартам пасивного будинку до абсолютно не енергоефективних будівель.

Як було приведено раніше у нормативах більшості країн ЕС значення величини повітропроникності не повинно не перевищувати $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. На графік нанесено рекомендоване значення повітропроникності $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. За приведеними даними визначено, наскільки відхиляється фактичний показник повітропроникності будівель від рекомендованого мінімального нормативного значення $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$, яке повинно відповідати будівлям класу енергоефективності С. $q_{50} < 2,0 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$, повинно відповідати будівлям класу енергоефективності В. $q_{50} < 1,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$, повинно відповідати будівлям класу енергоефективності А.

На наступних графіках (рис. 3-6) показано залежність окремо для кожного класу енергоефективності та виконано порівняння з граничними значеннями повітропроникності q_{50} із n_{50} за [3]: для класу С $n_{50} = 2,0 \text{ год}^{-1}$, для класу В $n_{50} = 1,5 \text{ год}^{-1}$, для класу А $n_{50} = 0,8 \text{ год}^{-1}$. З рис. 3 видно що чотири з 10 об'єктів класу А не відповідають значенню повітропроникності $q_{50} < 1,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ в середньому на $0,2 \dots 0,4 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. За параметром n_{50} усі будівлі відповідають класу енергоефективності А, $n_{50} = 0,8 \text{ год}^{-1}$.

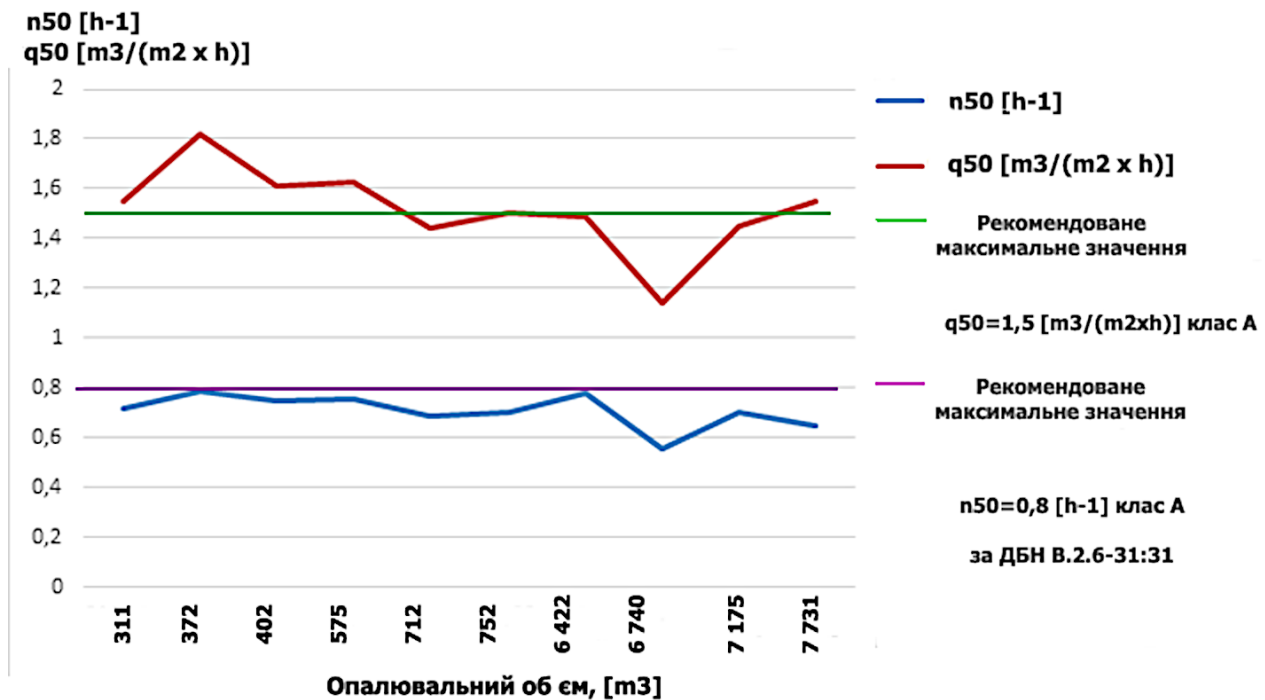


Рис.3 Графік залежності n_{50} та q_{50} від об'єму для класу «А»

Можна зробити висновок що навіть для будівель класу енергоефективності «А», значення n_{50} та q_{50} не відповідають одне одному.

Розглянемо залежності параметрів q_{50} та n_{50} у енергоефективних будівлях класу В, для яких повинно бути $q_{50} < 2,0 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ (рис.4). Більшість об'єктів класу В не відповідають значенню повітропроникності $q_{50} < 2,0 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ у середньому на $1,0 \dots 1,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. За параметром n_{50} майже всі будівлі відповідають класу енергоефективності В: $n_{50} = 1,5 \text{ год}^{-1}$. Можна зробити висновок що для будівель класу енергоефективності «В» значення n_{50} та q_{50} також не відповідають одне одному із ще більшою розбіжністю.

З рис.5, видно, що всі об'єкти класу енергоефективності С не відповідають значенню повітропроникності $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. За параметром n_{50} усі будівлі відповідають класу енергоефективності С: $n_{50} < 2,0 \text{ [h}^{-1}\text{]}$. Отже, для будівель класу енергоефективності «С» значення n_{50} та q_{50} також не відповідають одне одному із ще більшою розбіжністю ніж у класах В та А.

Із графіку залежності параметрів q_{50} та n_{50} у не енергоефективних будівлях класів D, E, F, (рис.6) видно, що всі об'єкти класів D, E, F, не відповідають нормативно допустимому значенню повітропроникності $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. За параметром n_{50} усі будівлі також не відповідають нормативно допустимому значенню класу енергоефективності С, $n_{50} = 2,0 \text{ [h}^{-1}\text{]}$. Можна зробити висновок що для будівель класу енергоефективності «D, E, F» значення n_{50} та q_{50} не відповідають одне одному із ще більшою розбіжністю ніж у класах С, В та А.

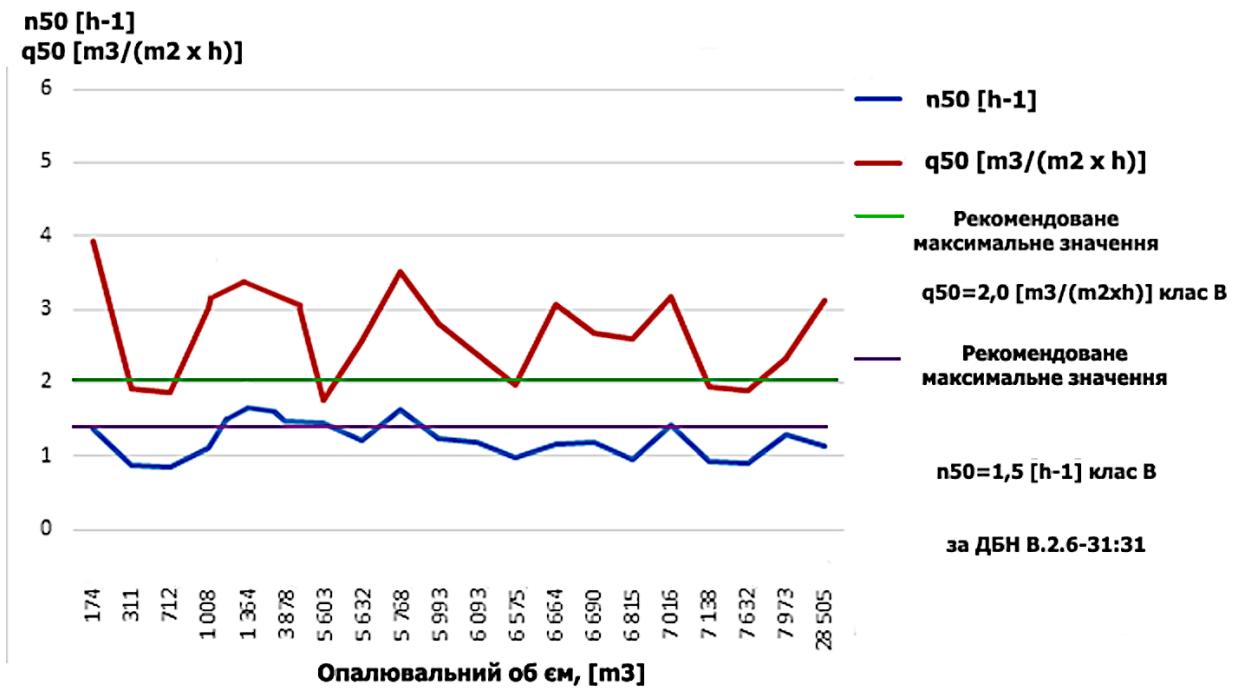


Рис.4 Графік залежності n_{50} та q_{50} від об'єму для класу «В»

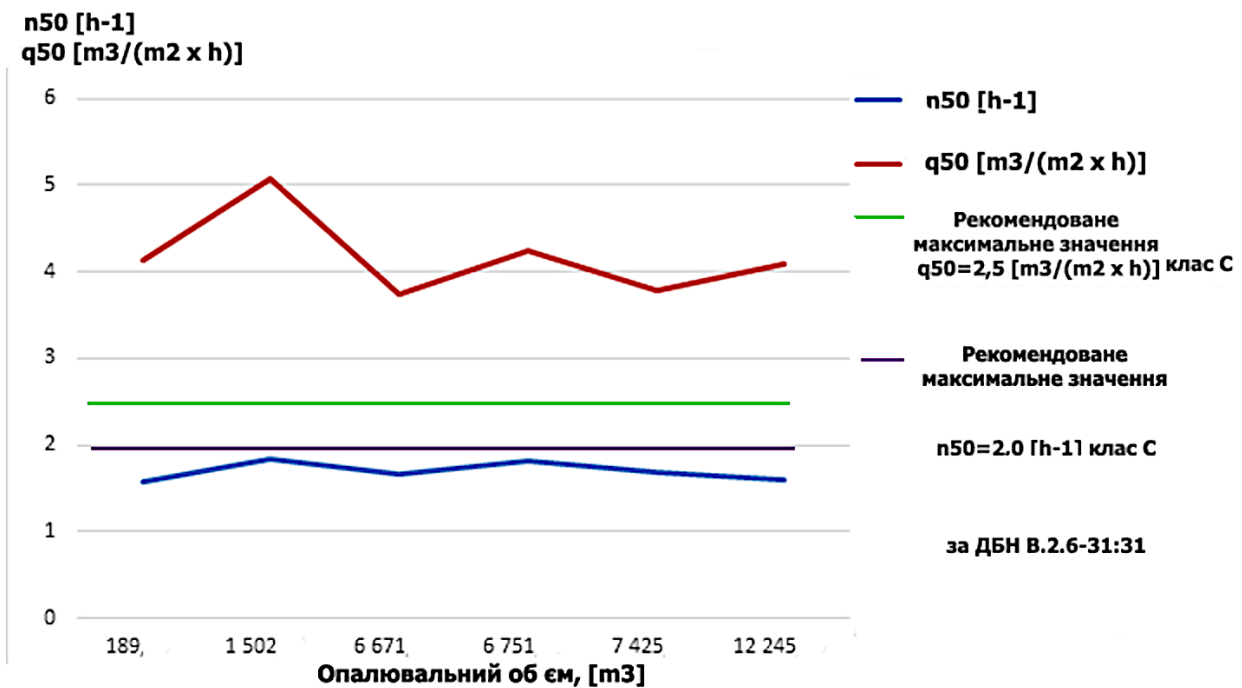
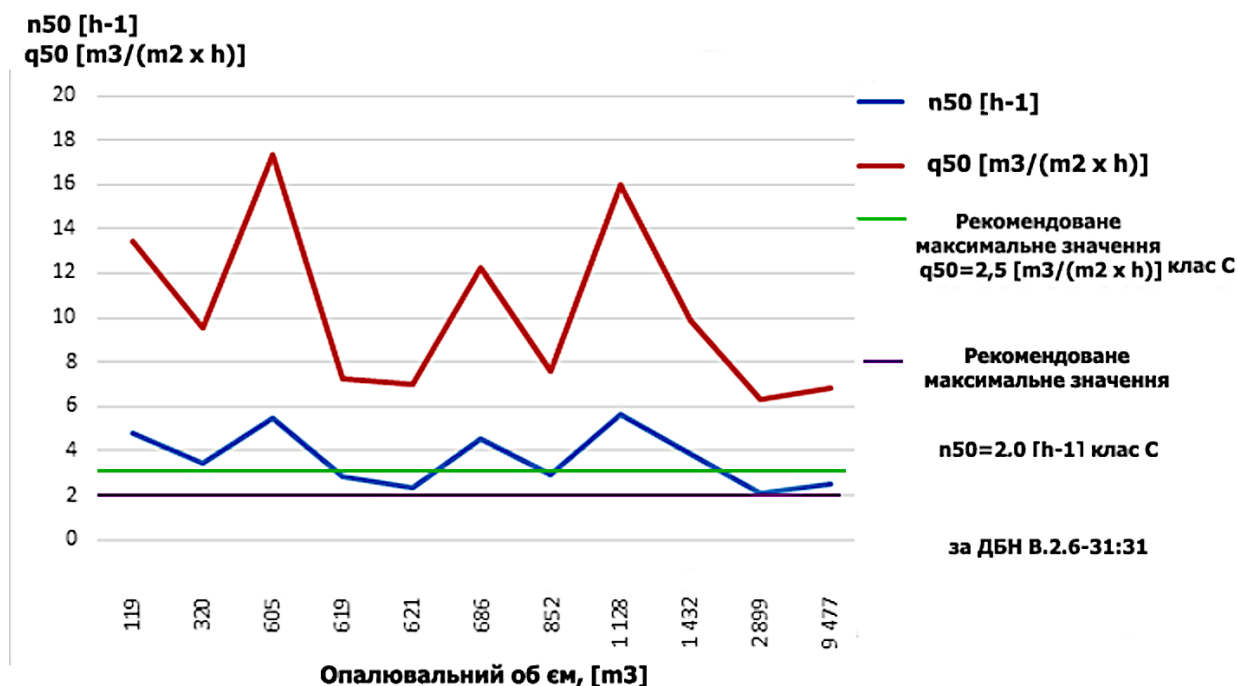


Рис.5 Графік залежності n_{50} та q_{50} від об'єму для класу «С»

Рис.6 Графік залежності n_{50} та q_{50} від об'єму для класу «D,E,F»

У результаті аналізу табл.1 пропонується установити нормативне значення повітропроникності q_{50} відповідно до даних країн з максимально близькими кліматичними параметрами до України. Такими країнами є Німеччина, Великобританія та Польщі, для яких $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$, Україна може перейняти досвід цих країн у сфері енергоефективності та гармонізувати свої нормативи з ними, тобто прийняти $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$. Необхідно внести зміни у нормативні документи України ДБН В.2.6-31:2021 [3], та ДСТУ 9191:2022 [10]. Повітропроникність будівель необхідно розраховувати за параметром q_{50} замість n_{50} .

Висновки. Визначення повітропроникності через параметр n_{50} є некоректним. Виявлено велику розбіжність між визначенням енергоефективності за параметрами n_{50} та q_{50} . Також отримано залежність: чим нижче клас енергоефективності, тим більша невідповідність між визначенням класу енергоефективності за n_{50} та q_{50} . Виявлено, що українські норми повітропроникності та енергоефективності будівель значно відстають від європейських норм (рис. 2.). Тест із визначення фактичної повітропроникності повинен проводитись та розраховуватись за параметром q_{50} , із забезпеченням контролю якості проведення тесту. Необхідно внести зміни у нормативні документи України ДБН В.2.6-31:2021, та ДСТУ 9191:2022. Повітропроникність будівель необхідно розраховувати за параметром q_{50} замість n_{50} . Пропонується установити нормативне значення повітропроникності $q_{50} < 2,5 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$, що відповідає нормативам Німеччини, Великобританії та Польщі. Адже клімат цих країн схо-

жий із кліматом України.

References

1. Bondarenko A, Yurchenko Eu.L., Koval O. O., Tymoshenko O.A. "Improvement of methodological basis of determination of tightness of building cover". Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture, No 3, 2022, p. 27-34
2. Thermal performance of buildings — Determination of air permeability of buildings — Fan pressurization method, UK Standard, ISO 9972:2015, ISO, 2015.
3. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel, DBN B.2.6-31:2021, Ukrarkhbudininform, 2022
4. ATTMA The Air Tightness Testing & Measurement Association. Buckinghamshir, HP7 OUT, 2010. 31p.
5. Pastatų energinio naudingumo projektavimas STR 2.05.01:2013. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.462390/QskEtkOdHd>
6. Ēku norobežojšo konstrukciju siltumtehnika. LBN 002-15, 2015ю <https://likumi.lv/ta/id/275015-noteikumi-par-latvijas-buvnormativu-lbn-002-15-eku-norobezojoso-konstrukciju-siltumtehnika->
7. Haldame ja arendame Eesti kinnisvara. RKAS (EE). <https://www.rkas.ee/>
8. Energieeinsparverordnung. EnEV, 2017.
9. Important facts about DGNB certification. German Sustainable Building Council, DGNB, <https://www.dgnb-system.de/en/>
10. Teploizoliatsiia budivel. Metod vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel. DSTU 9191:2022, UkrNDNTs, 2022

UDC 697. 644.1

Postgraduate, assistant professor. **Andrii Bondarenko**,
bondarenko.andrii@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4531-2556,
Associate Professor **Eugenii Yurchenko**,
yel@mail.pgasa.dp.ua, ORCID: 0000-0002-9356-3261,
Associate Professor **Olena Koval**,
koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7805-6811,
student. **Artem Koval**
22230-eeb.koval@365.pdaba.edu.ua

Pridniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture,
St. Architect Oleg Petrov, 24-a, Dnipro 49005, Ukraine

DETERMINATION OF AIR PERMEABILITY OF BUILDINGS

Abstract. *The air permeability of the building determines the level of energy efficiency of the building. The regions of the European Union are approaching NZEB standards and passive house standards. The Ukrainian regulatory framework for airtightness does not meet European standards for energy-efficient buildings and will require updating, as there will be an increase in the wind permeability of the building, and the increase is possible to the normatively permissible value, increased air permeability and energy efficiency. The permeability is expressed by the value of the air flow in cubic meters per year per square meter of the area of the outer shell of the booth when there is a pressure difference in the internal air of 50 Pa. Air permeability will need to be specified by parameter q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] instead of n_{50} [h^{-1}]. All countries of the European Union may use the q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] parameter in their standards. Exclusions are Lithuania and Ukraine, where the actual air permeability is determined by the parameter n_{50} [h^{-1}]. Based on the Ukrainian standard for air permeability, air permeability is calculated by n_{50} [h^{-1}]. For energy efficiency class C, values $n_{50} < 2.0$ [h^{-1}] are allowed, which is approximately the same value as $q_{50} < 5.0$ [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]. Following the Lithuanian standard, which also corresponds to the vicoristics n_{50} , where $n_{50} < 1.0$ h^{-1} , which is approximately the same value as $q_{50} < 2.5$ [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]. It is proposed to establish new standard values for the air permeability and energy efficiency in line with European standards. The results of penetration tests of 24 objects of different heating volumes and energy efficiency classes were analyzed. It's shown that lowering the energy efficiency class disharmonises the n_{50} and q_{50} values. The results allow proposal to set the normative value $n_{50} < 2.5$*

Key words: *energy efficiency, air permeability, international standard, methodology, BlowDoor, tightness, NZEB, passive house.*

УДК [662.997:621.176]:625.42

аспір. **Вадим Задіранов**,
vadimharij@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9179-9753,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова

ОГЛЯД ДОСВІДУ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Анотація. Вичерпність традиційних викопних джерел енергії веде до дедалі ширшого освоєння нетрадиційних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів альтернативної енергетики є використання низькопотенційної енергії ґрунтового масиву для опалення будівель і споруд різного призначення за допомогою теплового насоса. У метрополітені виділяється значна кількість теплоти, особливо під час гальмування поїздів, їхнього зупинення на платформах та під час набирання швидкості при початку руху від станції. У сучасних метрополітенах України, система вентиляції спроектована таким чином, щоб справлятися зі зростанням температури в тунелях і на станціях. У цій статті розглядається можливість використання скидної теплоти підземних залізничних систем як джерела низькопотенційної енергії для забезпечення теплою, наприклад, прилеглих будівель. Представлено різні технології утилізації теплоти, що відходить з підземних залізничних тунелів, які вже було реалізовано або моделі яких технічно та економічно обґрунтовано.

Ключові слова: тепловий насос, скидна теплота, утилізація теплоти, метрополітен, енергетичний тунель, геотермальна енергія

Вступ. Однією з найбільш нагальних проблем людства є постійне зростання споживання енергії. У зв'язку з цим останні десятиліття у світі значно зріс інтерес до альтернативних поновлюваних джерел енергії. Це викликано не лише обмеженістю ресурсів викопної сировини, а й необхідністю вирішення екологічних проблем. Згідно зі звітами експертів спільноти REN21 станом на 2022 рік майже 50% загального споживання енергії та 40% викидів парникових газів припадає саме на опалення та охолодження приміщень, включно з нагріванням води.

У липні 2021 року Уряд України затвердив мету – до 2030 року зменшити викиди парникових газів на 65% від рівня 1990 року. Понад 130 країн світу розробили й офіційно ухвалили стратегії з декарбонізації економіки. Україна також взяла на себе подібні зобов'язання: 2023 року було створено Державний

фонд декарбонізації та енергоефективної трансформації.

Не дивно, що попит на відновлювані джерела енергії, такі як геотермальні; утилізацію скидної теплоти промислових підприємств і підземних залізниць постійно зростає. Використання джерел низькопотенційної енергії за допомогою теплових насосів є ефективним рішенням і з кожним роком стає все більш популярним.

Залізничні тунелі є надійним джерелом відпрацьованої теплоти в містах, де громадський транспорт значною мірою залежить від підземних систем метро. Система метрополітену споживає велику кількість електричної енергії під час його регулярної роботи. Споживана електрична енергія перетворюється на теплоту. Дослідження показали, що в ґрунтах, які оточують тунелі метрополітену, відбувається накопичення теплової енергії, що виділяється в процесі експлуатації. Навколо тунелю відбувається формування теплового резервуара, унаслідок чого підвищується температура повітря в тунелі. Сучасні технології дають змогу здійснювати відведення теплоти з подальшим його використанням на обігрів будівель на поверхні, а також для обігріву приміщень станцій метрополітену. Наприклад, компанія Paris Habitat, яка надає жителям французької столиці комунальні послуги, з 2011 р. обігріває 17 квартир житлового будинку, розташованого над станцією метро, за рахунок надлишкової теплоти, що виділяється під час руху електропоїздів, силовими трансформаторами, від пасажиропотоків тощо. У метрополітені Стокгольма аналогічні тепловиділення дають змогу нагрівати воду, яку потім застосовують для опалення 13-поверхової офісної будівлі.

Однак під час використання тепла, що відходить з підземних систем метрополітену, виникає безліч проблем, і важливо ретельно вибрати найбільш доцільну технологію для утилізації теплоти, що відходить, з тунелів, з максимальною енергоефективністю без будь-яких ризиків для безпечної та надійної роботи міських транспортних систем.

Актуальність дослідження. Утилізація скидної теплоти метрополітену за допомогою теплових насосів є енергоефективним рішенням. До того ж воно дасть змогу значно скоротити викиди парникових газів.

Формулювання цілей статті. Аналіз можливостей і технологій утилізації скидної теплоти залізничних тунелів метрополітену.

Підземний метрополітен як міське джерело скидної теплоти. За даними Міжнародної асоціації громадського транспорту (UITP) у 2019 році метрополітени світу перевозили майже 190 мільйонів пасажирів на день [1]. Наприклад, пасажиропотік лише Лондонського метрополітену становив 1,5 мільярди пасажирів на рік. Якщо взяти для прикладу метрополітен України, то згідно з даними Головного управління статистики в Харківській області за

2021 р. кількість перевезених пасажирів Харківським метрополітеном становила 158 585,6 тис. пасажирів [2]. Ці значення, ймовірно, зростатимуть і надалі через збільшення транспортних систем і кількості жителів мегаполісів.

Пасажири вимагають частіших і швидших поїздів, що призводить до зростання споживання енергії, значна частина якої зрештою буде відводитися в тунель у вигляді теплоти. Значна частина цієї енергії може бути регенерована, проте частина, що залишилася, все одно створює велике теплове навантаження на навколишнє середовище тунелю. Це було доведено в роботі [3], де показано, що основним джерелом теплоти в тунелі є гальмівний механізм, а у вагоні поїзда - пасажири (рис.1 і 2)

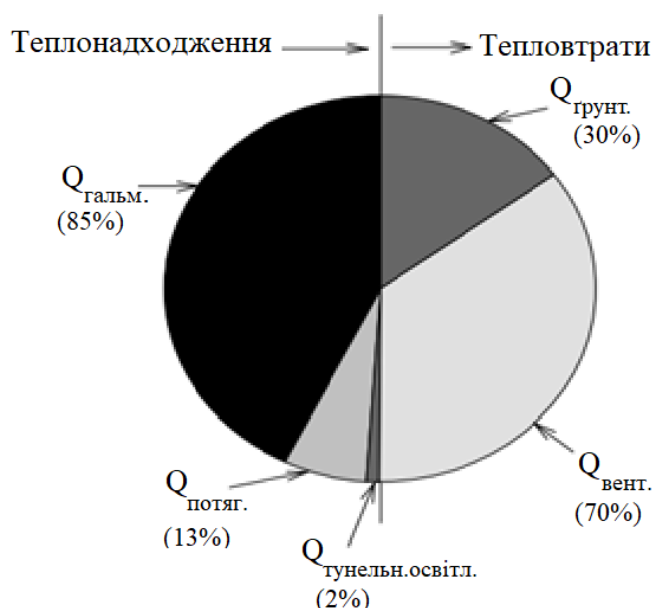


Рис.1 Тепловий баланс для тунелю

Грунт, що оточує типовий глибокий тунель підземних залізничних сполучень, також містить велику кількість теплової енергії через ефект тепловідведення, який земля забезпечує тунелю. У роботі [3] показано, що теплота, поглинута землею, що оточує підземний залізничний тунель, становить 30 % від загального тепловиділення і містить приблизно 4500 ГДж теплової енергії на кілометр тунелю. Ця енергія є низькопотенційною і має температуру приблизно від 20 °С до 30 °С [4]. Важливо зазначити, що в роботі [3] використовувалися тільки розрахунки в стаціонарному режимі з постійним коефіцієнтом конвективної теплопередачі. Результати попередніх досліджень показали, що між геотермальним тепловим насосом і підземним залізничним тунелем існує взаємодія, і тому ця область заслуговує на подальше вивчення для підвищення енергоефективності установок геотермальних теплових насосів поблизу метрополітену.

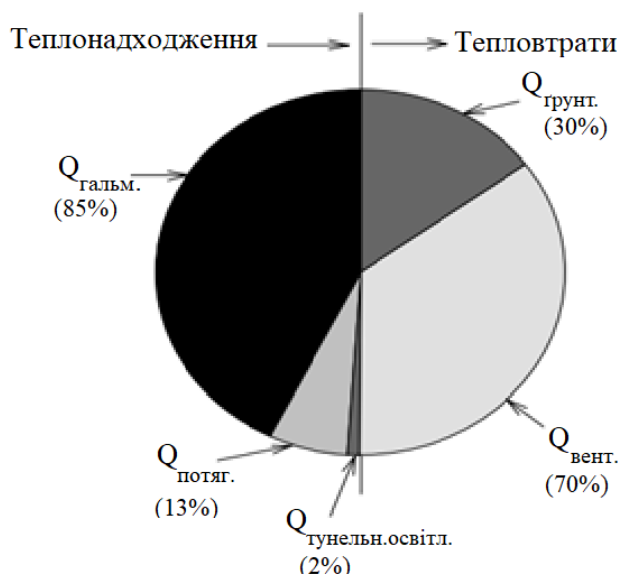


Рис.2 Тепловий баланс для вагону

Потенціал відновлення вторинної енергії з підземних залізничних тунелів у Великій Британії досліджували й у роботі [5], які проаналізували повітряний потік, температуру повітря та відносну вологість у тридцяти різних точках мережі метрополітену Глазго. Автори виміряли річні температури на станції метро Глазго і показали, що вони становлять від 15 до 18 °С, у той час як середні зовнішні температури можуть коливатися від 4 до 16 °С, що вказує на те, що теплові насоси можуть працювати більш ефективно, використовуючи підземне повітря метрополітену як джерело тепла.

Потенціальні технології утилізації відхідної теплоти з підземних залізничних тунелів.

Теплообмінник встановлюється у вентиляційній шахті метрополітену. Джерелом теплоти, в даному випадку, є повітря температурою від 20 °С до 28 °С. Технологію вилучення теплоти було проаналізовано в [6]. Досліджувалася можливість утилізації теплоти, що відходить із вентиляційних шахт мережі лондонського метрополітену, шляхом впровадження повітряно-водяного теплообмінника, під'єданого до теплового насосу. Потенційна економія енергії, зменшення викидів вуглецю і витрат системи була розрахована порівняно з традиційним охолодженням і опаленням, що ґрунтуються, відповідно, на системах охолодженої води і газових котлах. Результати показали, що система утилізації теплоти, яка відходить, може призвести до значної економії:

- на 79 % менша кількість споживаної енергії
- на 48 % менші викиди парникових газів
- на 82 % менші експлуатаційні витрати.

Аналогічна схема реалізується в лондонському районі Іслінгтон. Схема, відома як система утилізації відпрацьованої теплоти Bunhill 2, заснована на

встановленні теплообмінника всередині вентиляційної шахти мережі Лондонського метрополітену [7].

На першому етапі система вловлює теплоту, що виділяється метрополітеном, для чого у вентиляційній шахті встановлюється теплообмінник "повітря-вода". Теплообмінник, який використовується в цій системі утилізації відпрацьованої теплоти, – це вентиляторний довідник. Вентиляційну шахту було адаптовано для розміщення теплообмінника. Для цього було побудовано будівлю, в якій було встановлено теплообмінники, а також модернізовано реверсивний вентилятор з регульованою швидкістю обертання, що знаходиться у вентиляційній шахті. Реверсивний вентилятор дає змогу системі працювати або на витяжці гарячого повітря з підземного приміщення, яке потім можна використати для нагрівання води в змішувачах, або на використанні навколишнього повітря, яке охолоджують змішувачі, і потім подають до підземного приміщення, а видобуту теплоту утилізують теплообмінником (рис. 3).

Температура повітря, що виходить через вентиляційну шахту, варіюється від 18°C до 28°C. Таким чином, перший водяний контур, що переносить тепло від вентиляційної шахти до теплового насоса, також працюватиме з температурами припливу і витяжки, що змінюються залежно від сезону року. Очікувані робочі температури подавання та звороту варіюються від 11 до 18 °C і від 6 до 13 °C, відповідно.

Після відбору теплоти у вентиляційній шахті перший водяний контур передає рекуперовану теплоту до двоступеневого теплового насоса "вода-вода", який спроектовано з урахуванням температури подавального та зворотного трубопроводів мережі централізованого теплопостачання 55 °C і 75 °C, відповідно. Оскільки випарник і конденсатор працюють з великою різницею температур, то в цьому випадку було використано двоступеневий тепловий насос. Одноступеневе стиснення призвело б до зниження ефективності та продуктивності системи.

Для акумулювання та зберігання теплової енергії встановлено теплоаккумуляційний бак, заповнений водою об'ємом 77,5 м³. Накопичення енергії має вирішальне значення для управління піковим попитом, забезпечуючи надійність системи в цей період. Трубопровідна мережа при цьому дуже добре ізольована, щоб звести до мінімуму втрати тепла на шляху до будівель.

Ця технологія дає змогу витягти значну кількість теплоти з мінімізацією перебоїв у обслуговуванні. При цьому з вентиляційної шахти утилізується 780 кВт теплоти.

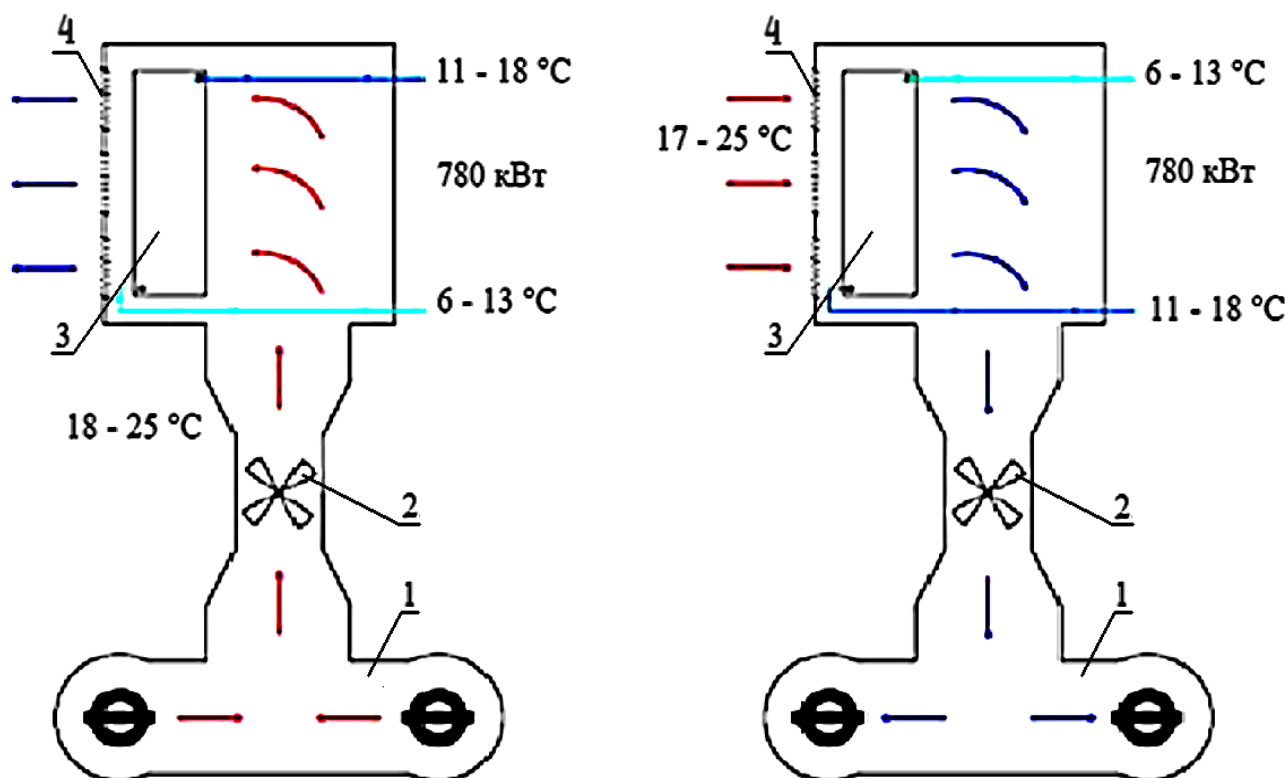


Рис.3 Схема теплообмінника та вентиляційної шахти енергетичного центру Bunhill 2 [7]

Технологія дає змогу знизити потенційний викид вуглецю на 82 % у 2022 році та зменшити витрату коштів на електроенергію на 14%. Однак ця технологія все ще має обмеження, пов'язані з наявною системою вентиляції лондонського метрополітену, а саме обмежений простір усередині наявних шахт і низька потужність вентиляторів, що використовуються для вентиляції.

Геотермальні теплові насоси поруч з тунелем метрополітену. Ґрунт, що оточує типовий тунель глибокого рівня закладення метрополітену, виділяє велику кількість теплової енергії завдяки тепловідведенням тунелю до землі. Ця енергія низького потенціалу може бути вилучена прилеглими теплообмінниками. Однак, існує обмеження на те, наскільки близько до тунелів можна монтувати систему. Мінімальна відстань, яку допускає Лондонський метрополітен, становить близько 3 м по горизонталі та 6 м по вертикалі [8]. У літературі дослідники наводять різні значення відстані теплового ефекту від стіни тунелю метрополітену до ґрунту. У роботі [9] виміряно зміни температури ґрунту поруч із прохідними тунелями до відкриття пасажирського руху по лінії Вікторія в Лондоні. Через чотири роки після початку руху стабільні температурні умови ще не були досягнуті, і за 9,1 м від тунелю температура глини продовжувала підвищуватися. У роботі [10] припускається, що тепловий ефект від стіни залізничного тунелю, збудованого в алевритовій глині, може досягати 20 м. Це означає, що ділянки тунелю глибокого закладення завдовжки

136 км і діаметром 3,7 м потенційно можуть забезпечити значний об'єм ґрунту орієнтовно понад 200 млн м³. Цей ґрунт містить значну кількість низькопотенційної енергії для потенційного використання прилеглими теплообмінниками, під'єднаними до теплового насоса (рис. 4).

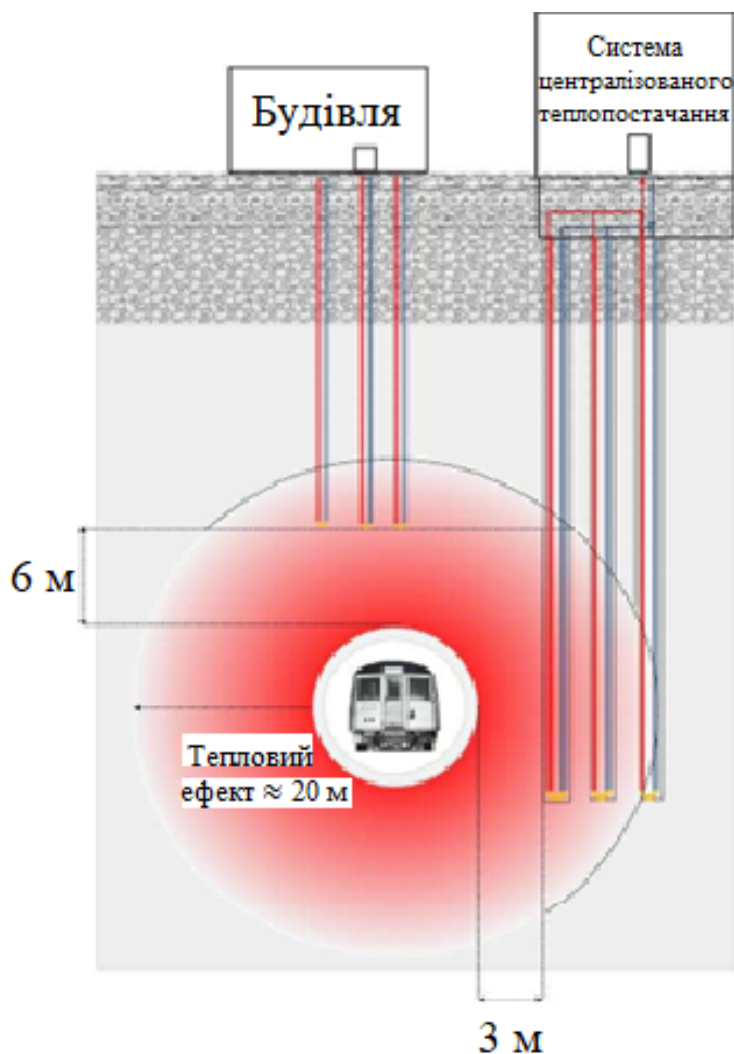


Рис. 4 Тепловий ефект від ґрунту навколо тунелів

Було розроблено модель скінченних елементів [11,12] для аналізу можливостей підвищення продуктивності теплових насосів під час розміщення поруч із залізничними тунелями, оскільки різні конфігурації теплообмінників з різною кількістю рядів і петель, розмірами, а також близькістю до тунелів можуть вплинути на їхню швидкість тепловідведення. Як приклад було обрано Лондон, тому геометричні параметри, властивості матеріалів, початкові, граничні та робочі умови, реалізовані в моделі, були засновані на типових умовах для столиці Великої Британії. Результати чисельних досліджень показали, що продуктивність системи можна підвищити до 43% залежно від її розміру, форми та близькості до тунелю. Це підвищить продуктивність

теплого насоса, що призводить до суттєвої економії як експлуатаційних витрат, так і викидів вуглекислого газу. Результати також показали, що для досягнення більшого теплового ефекту від тунелю на вертикальний ґрунтовий теплообмінник його геометричний центр повинен бути розташований якомога ближче до геометричного центру тунелю. Для того, щоб мати змогу охарактеризувати теплову взаємодію між підземним залізничним тунелем і вертикальним ґрунтовим теплообмінником, було запроваджено нову геометричну змінну, яка визначається як близькість взаємодії (Ω). Було показано, що існує майже лінійна залежність між цією змінною і середнім тепловим навантаженням теплообмінника. Автори підрахували, що за температури в тунелі від 20 до 30 °C можна видобути кількість теплової енергії, що дорівнює від 20 до 29 Вт/м довжини свердловини.

Прикладом встановлення геотермального теплового насоса в безпосередній близькості від тунелів Лондонського метрополітену є будівля під назвою One New Change. Ця будівля складається з 52 000 м² офісів і торгових площ на восьми поверхах. Геотермальна схема охоплює 219 енергетичних паль заввишки до 38 м і діаметром 2,5 м, а також двох глибоких водяних свердловин, які йдуть на 140 м углиб землі. Деякі з його вертикальних теплообмінників розташовано на відстані 7 м від стіни тунелю Центральної лінії Лондонського метрополітену. Загальна потужність системи геотермального теплового насоса на опалення та охолодження становить, відповідно, 1,6 МВт і 1,7 МВт.

Зазначена технологія здатна утилізувати теплоту з наявних залізничних тунелів, оскільки її можна використовувати незалежно від конструктивних елементів тунелю. Однак, високі капітальні витрати, пов'язані з бурінням свердловин, є недоліком застосування цього рішення. Інше питання, пов'язане з розвитком цієї технології, стосується власності на землю, оскільки теплові насоси доведеться встановлювати вздовж тунелів, на територіях, що можуть перебувати у приватній власності.

Енергетичні палі, енергетичні діафрагмові стіни, енергетичні платформи. Енергетичні палі, фундаменти, стіни та інші термоактивні ґрунтові конструкції покриттів є інноваційною технологією, яка сприяє захисту довкілля і забезпечує значну довгострокову економію коштів і мінімізацію технічного обслуговування. Абсорбційні труби, заповнені теплоносієм, встановлюються у звичайних конструктивних елементах (палі, діафрагмові стіни, фундаментні плити) з утворенням первинного контуру геотермальної енергетичної системи. Природна температура ґрунту використовується як джерело теплоти взимку та охолодження влітку. Первинний контур приєднується через тепловий насос до вторинного контуру всередині будівлі. За останні 20 років технологія енергетичних фундаментів та інших термоактивних систем наземних джерел

розвивалася надзвичайно активно, і новаторську роль тут відіграє Австрія.

Щоб модернізувати залізничну лінію між Віднем і Західною Європою для роботи в чотириколіїному режимі, було збудовано тунель Lainzer завдовжки 12,8 км, в якому на ділянці LT 24 було встановлено абсорбційні труби-теплообмінники. На одній ділянці тунелю Lainzer обшивка основної бічної стінки складається з буронабивних паль, при цьому кожна третя паля використовується як енергетична [13] (рис. 5, 6).

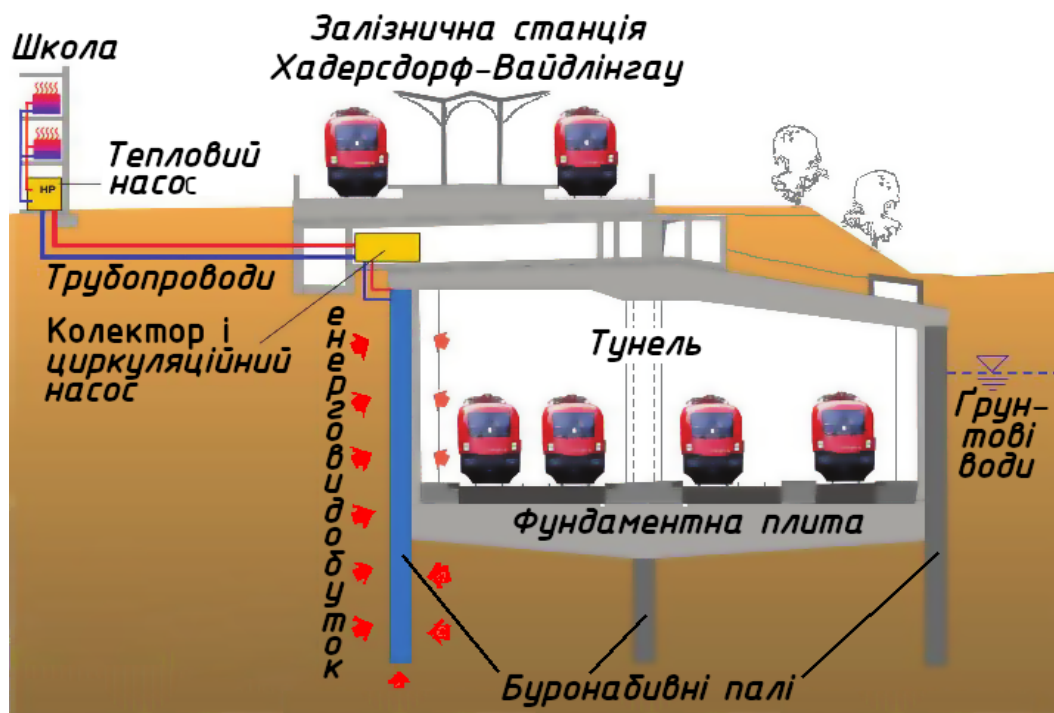


Рис.5. Схематичний поперечний переріз енергетичної установки на 150 кВт з річним обсягом видобутку 214 МВт·год під залізничною станцією Hadersdorf-Weidligau, де одна бічна стінка прохідницького тунелю використовується як енергетична стінка.

Первинне оздоблення (рис. 6) складається з буронабивних паль із колонами, залитими струменевим розчином між ними, і з'єднується з водонепроникною вторинною обшивкою за допомогою дюбелів. Кожна третя паля оснащена абсорбційними трубами, які розташовано за арматурними стрижнями і в такий спосіб захищено від пошкоджень шляхом встановлення дюбелів у внутрішньому облицюванні (залізобетонні панелі). На рис. 6 також показано розташування вимірювальних приладів у palі S-07-xx. Таким чином, дана енергетична установка складається з 59 буронабивних паль діаметром 1,2 м і середньою висотою близько 17,1 м. Абсорбційні труби з'єднано з колекторними трубами, що проходять через службове приміщення до шести теплонасосних установок сусідньої будівлі школи для її опалення.

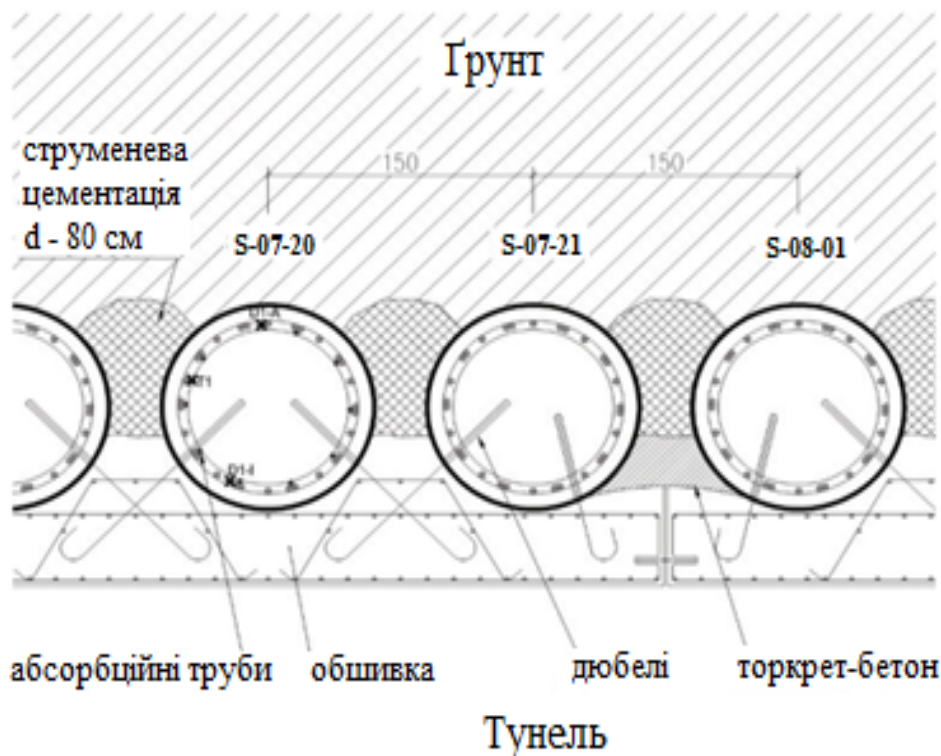


Рис. 6. Схема системи енергетичних паль

Початкова експлуатація енергоустановки розпочалася в лютому 2004 року. Близько 70 МВт·год теплової енергії було видобуто з енергетичних паль протягом перших місяців роботи. З осені 2004 року енергосистема забезпечує геотермальною теплою сусідню школу. Під час другого опалювального періоду взимку 2004/2005 року видобуто 186,2 МВт·год геотермальної теплоти, тоді як у 2005/2006 році було отримано 193,9 МВт·год. Ця кількість геотермальної енергії відповідала прогнозованій максимальній продуктивності за опалювальний сезон. Крім того, технологія є екологічно чистою та дозволяє скоротити споживання природного газу на 34000м³ на рік, що призводить до зниження річних викидів CO₂ на 30 т.

Дана технологія підходить для неглибоких тунелів, побудованих методом виїмки та покриття, що складаються з буронабивних стін, а також залізобетонних фундаментних плит і покриттів. Такі неглибокі тунелі роблять застосування цієї технології привабливішим, ніж глибокі тунелі, оскільки передача теплоти між джерелом і користувачем спрощується.

Абсорбційні труби прикріплені до геотекстилю між обшивкою тунелю.

У рамках дослідницького проєкту, відомого як GeoTU6 [14], поруч із тунелем Штутгарт-Фазаненхоф було прокладено геотермальний випробувальний маршрут. Проєкт GeoTU6 є практичним дослідженням використання геотермальної теплоти тунелів у внутрішніх міських районах. Цей проєкт вдалося реалізувати Інституту геотехніки Штутгарта під час будівництва

тунелю Фазаненхоф, викопаного методом NATM (New Austrian Tunnel Method). Основні питання GeoTU6 пов'язані з будівництвом геотермальної випробувальної ділянки, дослідженням властивостей геотермальних надр, реєстрацією температури надр, бетону й повітря, чисельними дослідженнями і моделюванням для встановлення ефективності абсорбційної системи і визначення діапазону зміни температури в навколишньому шарі, а також визначення еталонних параметрів для майбутніх геотермальних проєктів при прокладанні тунелів.

Суть технології полягає в монтуванні абсорбційних труб на геотекстиль, встановлений у зоні склепіння між торкрет-бетонною зовнішньою оболонкою і внутрішньою оболонкою з монолітного бетону. У кожному випадку було сформовано два контури, які склалися з абсорбційних труб завдовжки близько 400 м на площі близько 180 м². Були використані труби зі зшитого поліетилену високого тиску (25 x 2,3 мм), які кріпилися меандром між зовнішньою і внутрішньою обшивкою тунелю. Абсорбційні труби було з'єднано паралельно, що призводить до зменшення гідравлічного опору системи в поєднанні з поділом на два контури, що, крім іншого, спрощує продування труб. На рис. 8 показано попередньо зібрані абсорбційні труби.

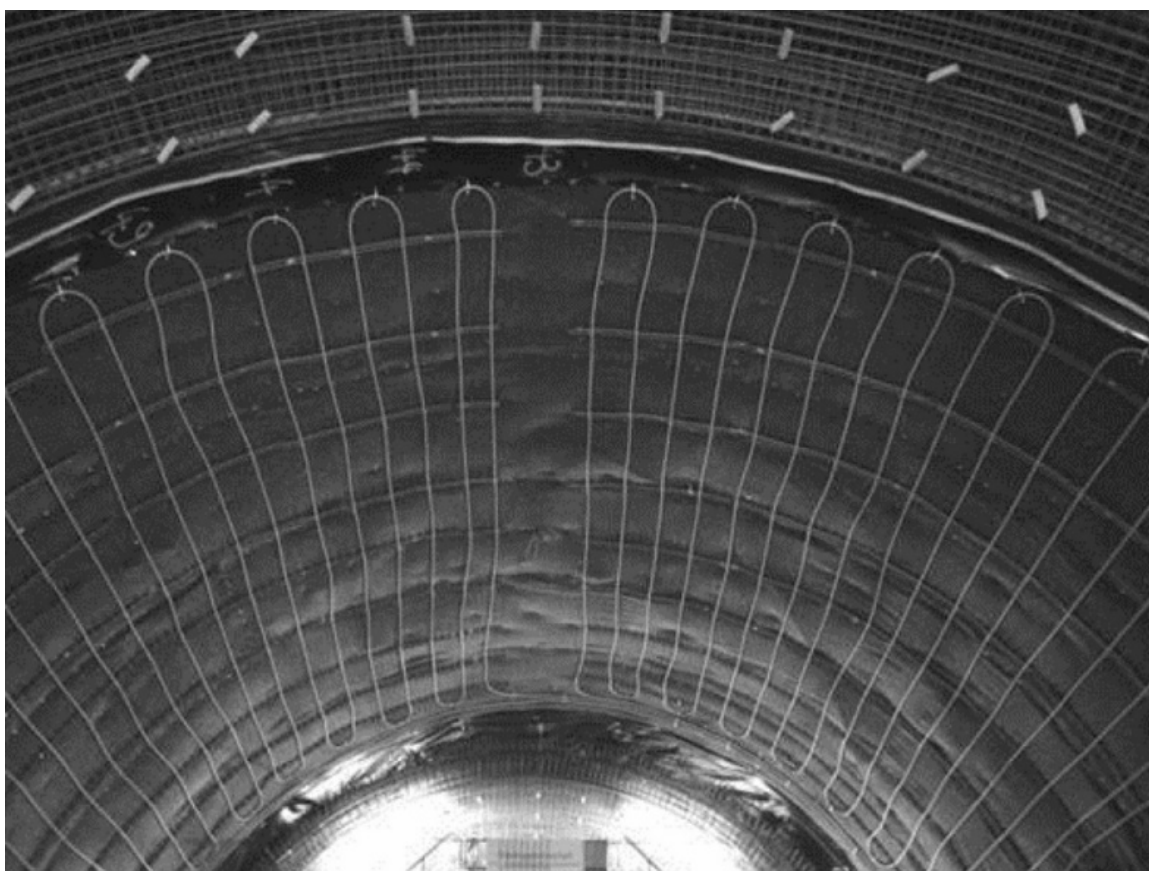


Рис. 7 Абсорбційні (поглинальні) труби, прикріплені до внутрішнього облицювання тунелю [14]

Активовані тунельні блоки оснащено системами реєстрації даних температури повітря в тунелі, футерування, а також навколишнього ґрунту. У кожному термоактивованому тунельному блоці встановлено кілька вимірювальних датчиків згідно з рис. 8, які вимірюють температуру у внутрішньому оздобленні тунелю. На основі цих даних можна розрахувати щільність теплового потоку зсередини тунелю за його радіусом.

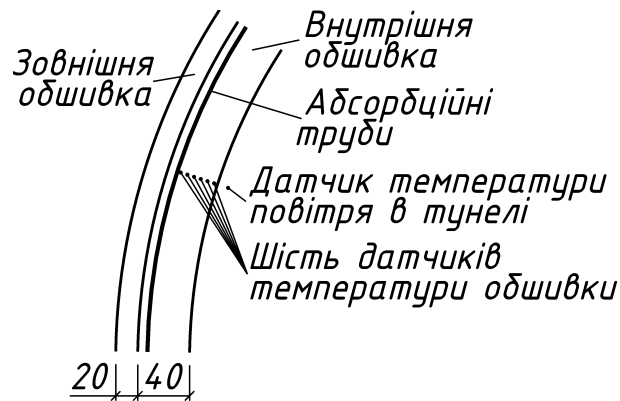


Рис. 8 Поперечний розріз облицювання тунелю

У підсумку всіх режимів роботи до квітня 2015 року, спостерігалось теплове навантаження до 20 Вт/м^2 [15]. Подальші дослідження показують, що за рахунок встановлення оптимізованих робочих параметрів густина теплового потоку може бути ще більшою.

Дана технологія установки геотермальних абсорбційних систем для охолодження та опалення станцій/ліній метрополітену підходить для тунелів, побудованих методом NATM. Технологія є не тільки екологічно чистою, а й високоекономічною інновацією.

Абсорбційні труби вбудовані в сегменти тунелю. Під час проектування підземних залізничних систем, побудованих із використанням механізованих тунелів, необхідно використовувати інший підхід до проектування. Конструкцію залізничних тунелів з абсорбційними трубами, вбудованими в сегменти обшивки тунелю, а саме систему тунельного енергетичного сегмента (TES), проаналізували автори [16], які показали, як можна забезпечити охолодження тунелів Crossrail у Лондоні, з утилізацією теплоти для обігріву прилеглих будівель. Термічні сегменти обшивки обмінюються теплотою з геологічними породами за допомогою теплопровідності, а також отримують тепловий потік від повітря в тунелі. Тепломеханічна модель була розроблена методом скінченних елементів з використанням мультифізичного програмного забезпечення для моделювання теплових характеристик системи TES шляхом аналізу того, як різне теплове навантаження впливає на температуру рідини-теплоносія. Результати показали, що густина теплового потоку обмежена

ризиком замерзання рідини і може досягати 30 Вт/м^2 [16].

Подібна система була запропонована у [16,17], де чисельно проаналізовано можливість розроблення енергетичного тунелю в Турині.

Аналіз ґрунтувався на розробленні скінченно-елементної термогідроделі для моделювання теплопередачі між трубами абсорбера всередині тунелю і навколишнім середовищем. Пропонована конструкція також складалася із закладених абсорберних труб у збірне залізобетонне облицювання тунелю і могла працювати в режимах охолодження й обігріву (рис. 9).

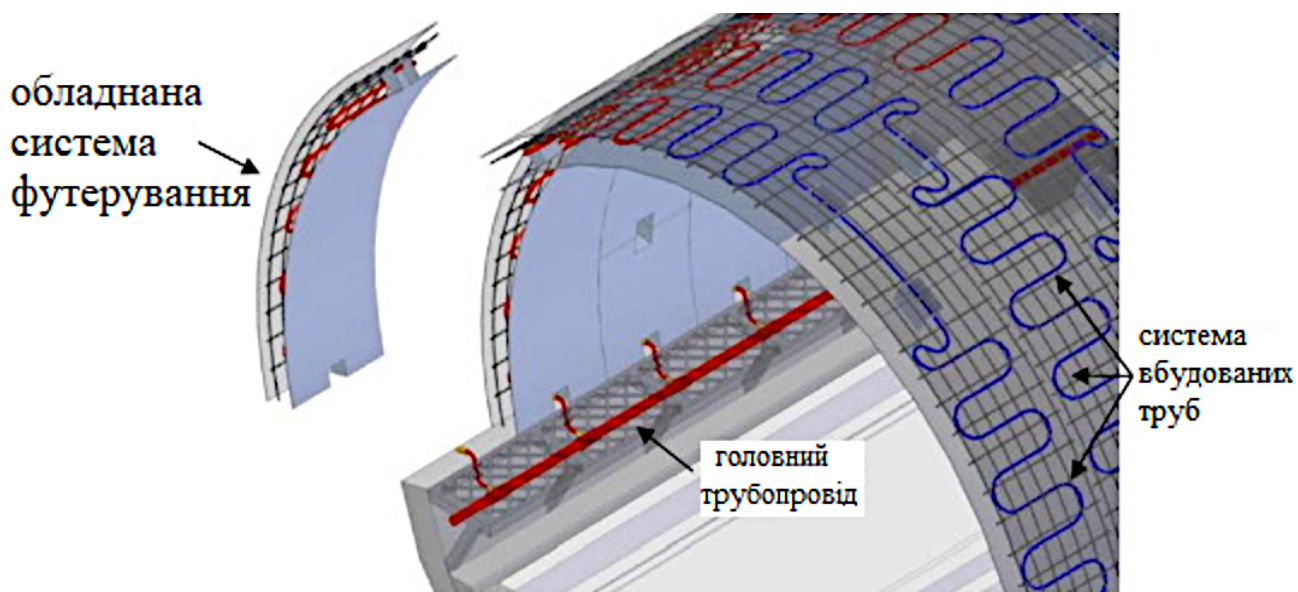


Рис.9 Схематичне зображення сегментного оздоблення тунелю, обладнаного ґрунтовим теплообмінником [17].

Завдяки сприятливим умовам течії підземних вод у Турині система обшивки енергетичного тунелю дає змогу досягти щільності теплового потоку від 53 до 74 Вт/м^2 узимку й улітку, відповідно. Ці значення дадуть змогу покрити потреби в енергії до $1,67 \text{ кВт}$ у режимі обігріву та $2,34 \text{ кВт}$ у режимі охолодження, з огляду на загальну довжину тунелю, що відповідає потребам в опаленні та охолодженні вежі регіону П'ємонте. За відсутності потоку ґрунтових вод термічно активні тунелі можуть забезпечити теплообмін приблизно від 10 - 20 Вт/м^2 .

Можливості впровадження утилізації теплоти метрополітену. Перевага інтегрування термоактивних систем у геотехнічні конструкції, як-от тунелі, полягає в тому, що конструкції будують у будь-якому разі, і, отже, додаткові витрати на їхнє встановлення невеликі порівняно із загальною вартістю. Термоактивні тунелі та наземні конструкції можуть забезпечити високу швидкість відведення теплоти. Однак, ці технології можуть застосовуватися тільки для нових проєктів метрополітену і не підходять для утилізації теплоти з

наявних тунелів. З цієї причини геотермальні технології мають бути долучені до геотехнічного проєктування на ранній стадії, що допомагає налагодити міждисциплінарне співробітництво між командами, відповідальними за проєктування носійної конструкції ґрунту і системи утилізації теплоти, що може скоротити час і витрати на установку, пов'язані з активним використанням енергії структурних елементів. Для наявних станцій і тунелів на сьогодні можлива утилізація теплоти витяжного повітря за рис. 3, але через додатковий аеродинамічний опір теплообмінників системи можуть вимагати модернізації вентиляційних установок.

Висновки. У результаті вивчення світових досліджень утилізації скидної теплоти метрополітену виявлено, що основним джерелом теплоти в тунелі є гальмівний механізм (85%), а у вагоні поїзда - пасажирів (74%). Тепловиділення однієї людини становлять близько 150 Вт. Безперервний стабільний тепловий ефект від рухомого складу становить 300-350 Вт/м залежно від типу поїзда, швидкості, завантаження та частоти руху. Встановлено теплове навантаження при застосуванні різних технологій утилізації скидного тепла залізничних тунелів. Теплообмінник усередині вентиляційної шахти метрополітену (Bunhill, Лондон, Великобританія) утилізує до 900 кВт теплоти з шахти за температури повітряного джерела теплоти 20-28°C. При установленні теплового насоса з ґрунтовим вертикальним теплообмінником поруч із лінією метрополітену (математичне моделювання, Лондон, Великобританія) густина теплового потоку становила від 20 до 29 Вт/м довжини свердловини при температурі в тунелі 20-30 °C. Абсорбційні труби встановлені в буронабивних палях (Lainzer, Відень, Австрія, за температури джерела теплоти понад 20 °C дають густину теплового потоку до 30 Вт/м² площі контакту із землею. Абсорбційні труби, прикріплені до геотекстилю між обшивками залізничного тунелю (GeoTU6, Штутгарт, Німеччина) за вихідної температури повітря 6,5 °C надають густину теплового потоку до 20 Вт/м² площі тунелю. Абсорбційні труби в сегментах тунелю (Crossrail, Лондон, Великобританія) за температури повітря 17-36 °C видобувають густину теплового потоку 10-30 Вт/м², а в тунелі метрополітену (Турин, Італія) за вихідної температури джерела теплоти 14 °C – 48-53 Вт/м². Таким чином, отримується суттєва кількість теплоти для обігріву сусідніх будівель. Проте рішення з убудованими абсорбційними трубами в конструкції тунелю придатні лише для нового будівництва, що вимагає тісної кооперації конструкторів з інженерами інших спеціальностей.

References

1. Statistics-Brief-Metro-Figures-2021. <https://www.uitp.org/publications/metro-world-figures-2021/>. Accessed 5 October 2023
2. Pasazhyrski perevezennia v 2021 rotsi. <http://kh.ukrstat.gov.ua/2021pasagirperevez/4283-arkhiv-pasazhirski-perevezennya-u-2021-rotsi>. Accessed 5 October 2023
3. Ampofo F, Maidment G, Missenden J. “Underground railway environment in the UK. Part 2: Investigation of heat load.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 24 iss. 5-6, 2004, pp. 633–645. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.018>.
4. Thompson J, Gilbey M, Maidment G. “Geothermal cooling of underground railways – the opportunity.” *Proceedings of the Institute of Refrigeration*, vol. 105, 2008.
5. Ninikas K., Hytiris N., Emmanuel R., Aaen B., Younger, P.L. Heat recovery from air in underground transport tunnels. *Renewable Energy*, vol. 96, part A, 2016, pp. 843–849. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.015>
6. Davies G., Boot-Handford N., Grice J., Dennis W., Rami R., Nicholls A., Maidment G. “Metropolitan Integrated Cooling and Heating.” *Proceedings of the ASHRAE Winter Conference, Las Vegas, NV, USA, 28 January–1 February 2017*. https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/b9c7a2f1ad19bceffa501f715c7aed7f057ed307024051ef53946403d7552095/516687/Paper_21109_Metropolitan_Cooling_and_Heating%20Final.pdf
7. Lagoeiro H., Revesz A., Davies G., Maidment G. “Heat from Underground Energy London (Heat FUEL).” *CIBSE Technical Symposium, Sheffield, UK 25-26 April, 2019, Session 10 Paper 1*
8. Deed concerning the mitigation of the effects of settlement arising from the construction works undertaken at [Location]. <https://content.tfl.gov.uk/nle-draft-settlement-deed.pdf> Accessed 5 October 2023
9. Cockram I.J., Birnie G.R., “The ventilation of London’s Underground Railway.” *2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Cambridge, 1976*, p. 11-27
10. Hu Z.H., Li X.Z., Zhao X.B., Xiao L., Wu W. “Numerical analysis of factors affecting the range of heat transfer in earth surrounding three subways.” *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 18, 2008, pp. 67-71 [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60015-2](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60015-2)
11. Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment G. “Modelling of Heat Energy Recovery Potential from Underground Railways with Nearby Vertical Ground Heat Exchangers in an Urban Environment”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, 2019, pp. 1059–1069. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.118>

12. Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment, G. “Ground Source Heat Pumps and Their Interactions with Underground Railway Tunnels in an Urban Environment: A Review.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 93, 2016, pp. 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.011>
13. Brandl H. “Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds.” *Procedia Engineering*, 165 (2016) 747 – 764
14. Research Project GeoTU6. GeoTU6 – a geothermal Research Project for Tunnels. https://www.tunnel-online.info/en/artikel/artikel_en_1274298.html Access date: 2 October 2023.
15. Geothermal use of tunnels. https://indico.cern.ch/event/1173667/attachments/2465651/4228155/Task%201-%20Thermal%20tunnel%20report_Issue_20220518.pdf. Accessed 5 October 2023.
16. Nicholson, D.; Chen, Q.; de Silva, M.; Winter, A.; Winterling, R. “The Design of Thermal Tunnel Energy Segments for Crossrail, UK.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 167, iss. 3, 2014, pp. 118–134. <https://doi.org/10.1680/ensu.13.00014>
17. Barla M., Di Donna A., Perino A. “Application of Energy Tunnels to an Urban Environment.” *Geothermics*, vol. 61, 2016, pp. 104–113, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.014>
18. Barla M.; Di Donna, A. “Energy tunnels: concept and design aspects.” *Underground Space*, vol. 3, Iss. 4, 2018, pp. 268-276, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.03.003>

UDC [662.997:621.176]:625.42

Post-graduate Vadym Zadiranov,
vadimharij@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9179-9753,
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

REVIEW OF THE EXPERIENCE IN UTILISING WASTE HEAT FROM THE METRO

Abstract. *The exhaustibility of traditional fossil energy sources is leading to the increasing use of unconventional energy sources. One of the most promising areas of alternative energy is the use of low-potential ground energy to heat buildings and structures for various purposes using a heat pump. The subway generates a significant amount of heat, especially when trains are braking, stopping on platforms and picking up speed when they start moving from the station. Thus, to combat the rise in temperature in tunnels and stations, a complex ventilation system is designed, including shafts, fans, and under-platform exhaust. In modern Ukrainian subways, the ventilation system is designed to cope with the rising temperatures in tunnels and stations. This traditional approach results in high energy consumption for running fans and ignores the possibility of using the extracted heat above ground in buildings. Techniques such as lining underground railway tunnels with heat exchanger segments, installing a heat exchanger in a subway ventilation shaft, installing geothermal heat pumps next to a subway tunnel, installing energy piles, energy baffle walls, energy platforms, and introducing absorption pipes into tunnel segments can provide an alternative solution to cool tunnels and the surrounding ground, and transfer the resulting heat to neighbouring buildings for heating. This would also have the benefit of reducing energy consumption for tunnel ventilation. This article discusses the possibility of using waste heat from underground railway systems as a source of low-potential energy to provide heat to, for example, adjacent buildings. Various technologies for utilising waste heat from underground railway tunnels that have already been implemented or whose models are technically and economically feasible are presented.*

Key words: *heat pump, waste heat, heat utilization, metro, subway, energy tunnel, geothermal energy*

УДК 620.9; 666.9-13

д.т.н., проф. Андрій Редько,
andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273,

Сумський національний аграрний університет

д.т.н., проф. Ігор Редько,
igor.redko1972@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1556-0830,

Український державний університет залізничного транспорту

к.арх. доц. Артем Бородай,
tyomaboroday@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4221-0332,

к.т.н., ст.викл. Сергій Андрух,
sl_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-885X,

ст. викл. Сергій Бородай,
boroday1@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1281-7766,

Сумський національний аграрний університет

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ РІДИНИ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК ТА РОЗЧИНЕНИХ ГАЗІВ

Анотація. Наведено результати розроблення технології та пристрій для очищення геотермальної рідини від механічних домішок та розчинених газів. Присутність розчинених вуглеводневих газів (метан і важкі вуглеводні до 60-90 %) у термальних водах суттєво підвищують їхній енергетичний потенціал. Однак, присутність розчинених CO_2 , N_2 , H_2S викликають корозію обладнання. Тому дегазація термальних вод та очищення від механічних домішок дозволяє підвищити надійність експлуатації геотермальних родовищ. Технологія забезпечує очищення геотермальної рідини від часток з дисперсністю від 50 до 300 мкм і карбонатно-кальцієвих механічних домішок та видалення розчинених газів. Технологія заснована на використанні гідродинамічних процесів поділу твердих домішок в турбулентному потоці рідини, що обертається. У пристрої розміщено лопатеві завихрювачі малого діаметра та вихрові турбулентні промивачі. Висока тангенціальна швидкість у завихрювачах забезпечує очищення рідини від домішок. За рахунок обертання потоку поверхня рідини диспергується з утворенням краплинно-зірнистого шару, крізь який проходить газ, що очищується. При зниженні тиску рідини в пристрої та завихрювачах з геотермальної рідини виділяються розчинені гази (метан, двоокис вуглецю, сірководень), які створюють достатньо високий тиск над рідиною для роботи завихрювачів. Остаточне очищення газів від краплинної рідини проводиться за допомогою конусних лопаткових промивачів. Пристрій може бути використаний у технологіях розроблення геотермальних родовищ

Ключові слова: механічні домішки, турбулентний потік, геотермальна рідина, дисперсність, гідродинамічний процес, поділ твердих домішок, геотермальне родовище.

Вступ. Наявність механічних домішок та піску в експлуатаційних свердловинах знижують надійність циркуляційних геотермальних систем. Збільшення дебіту свердловин призводить до збільшення депресії на пласт та збільшення виносу твердих частинок. Продукти корозії експлуатаційної колони є джерелом механічних домішок, руйнування гірських порід також призводить до винесення механічних домішок. Причинами передчасного виходу з ладу занурювальних електровідцентрових насосів (ЕЦН) є абразивне зношування і засмічення насосів твердими частинками, зваженими в потоці рідини, що перекачується, а також вібрація насосів. Великі механічні частинки викликають заклинювання насосів, а дрібні-вібрацію та абразивне зношування. За технічними умовами експлуатації ЕЦН допускається кількість механічних домішок трохи більше 100 мг/л. Пропонуються стандартні технічні рішення (шламовловлювачі, фільтри) для захисту ЕЦН. Однак ефективність механічних пристроїв захисту ЕЦН залежить від розміру частинок (100–500 мкм), швидкості та масової витрати рідини. Розробляються різні методи захисту ЕЦН від впливу механічних домішок. Однак ефективність засобів та обладнання захисту недостатня. В даний час розроблено велику кількість конструкцій свердловинних фільтрів: щілинні, каркасно-дротяні та сітчасті. При інтенсивному винесенні механічних частинок застосовуються сепаратори механічних домішок та шламовловлювачі. Однак строк експлуатації їх становить до 100 діб і потрібний ремонт. Зменшення міжремонтного періоду технологічного обладнання знижує рентабельність виробництва теплоти. Кожна конструкція характеризується певними умовами експлуатації, рядом переваг та недоліків. Універсальних конструкцій не існує. Найбільш ефективним підходом до проблеми винесення механічних домішок у геотермальній рідині є розроблення заходів та пристроїв, що запобігають негативному впливу на промислове обладнання.

Утворення твердих відкладень на поверхнях технологічного та теплообмінного обладнання є однією із складних технічних проблем експлуатації геотермальних родовищ. У геотермальних циркуляційних системах також потрібне водопідготовка при зворотному закачуванні відпрацьованої геотермальної рідини до пласту. Хімічний склад відкладень складається з твердої фази карбонату кальцію. Відкладення утворюються внаслідок порушення карбонатно-кальцієвої рівноваги та виділення твердої фази CaCO_3 у розчині геотермальної рідини при виході на поверхню Землі. Геотермальні рідини також характеризуються високою мінералізацією від одиниць до 500 г/л

та складним хімічним складом.

Наявні технології не вирішують проблеми захисту геотермальних енергетичних систем та пристроїв від карбонатних відкладень. Використання хімічних реагентів стикається з економічними та екологічними проблемами. Недостатньо вивчено вплив інгібіторів на процеси масообміну при зворотному закачуванні геотермальної рідини у пласт. Вплив магнітного поля та ультразвуку не забезпечує надійного захисту від утворення відкладень. Основна маса частинок має розмір менше 3 мкм при концентрації 20-25 мг/л, що вказує на можливість застосування методу стабілізації геотермальної рідини кристалічною затравкою (подрібнені відкладення, крейда, пісок). Однак метод недостатньо вивчений. Таким чином, на сьогодні найбільш ефективним методом лишається сепарація.

Останні дослідження та публікації. Розчинність газів у рідинах суттєво залежить від складу, температури та тиску. Багато процесів здійснюються при тисках у кілька сотень атмосфер. Наприклад, при видобутку нафти та газу тиск може досягати до 500 – 700 атм. [3].

Підземні води містять розчинені гази, такі як азот, двоокис вуглецю, сірководень, метан та інші [4]. Кількість розчинених газів у водах окремих нафтогазових басейнів змінюється у широких межах. Вона залежить від потужності та властивостей водовмісних товщ, інтенсивності генерування та розсіювання вуглеводнів, газоємності пластових вод тощо. Так газонасиченість пластових вод Середньо – Каспійського нафтогазового басейну (Азербайджан) становить до 4 – 5 м³ газу при н. у. на 2 м³ пластової води [1]. При вивільненні газів у обмеженому просторі може утворюватися високий тиск – 10 і більше МПа. Як правило, кількість розчиненого газу зростає із збільшенням глибини, досягаючи 3 – 4 м³ газу при н. у. на 1 м³. У пластових водах нафтогазових басейнів кількість розчиненого газу може бути ще більшою. Вона досягає на глибинах 5 - 6 км до 5 - 6 м³ при н. у. і більше на 1 м³ пластової води. У нафтогазових басейнах серед розчинених газів переважають вуглеводневі гази, частка яких може досягати 90 - 98 % від загальної кількості розчинених газів [4].

Розчинність газів у рідинах суттєво залежить від складу, температури та тиску. Багато процесів здійснюються при тисках у кілька десятків мегапаскаль. Наприклад, при видобутку нафти та газу тиск може досягати до 50-70 МПа [3].

Вивченню складу, властивостей та параметрів розчинених газів у пластових водах присвячені роботи Корценштейна В.М. та Кірюшкіна В.М. [2, 3]. За даними численних глибинних досліджень, загальна газонасиченість підземних вод змінюється від 1,0 до 6 - 7 м³ на 1 м³ води. Найбільшою газонасиченістю відрізняються води періоду юри і неокома, води інших

комплексів, зокрема і тріасу, мають значно знижену газонасиченість [5]. У міру відновлення водовмісних порід, газ набуває більш однорідного (метанового) характеру. Головною складовою розчинених газів є вуглеводні (60 - 95 %), основною часткою яких є метан [5]. Тиск насичення розчинених газів пластових вод змінюється від 8 до 40 МПа і більше, тобто досягає величини пластових тисків на глибинах 3500 - 4000 м [5].

Використання газовмісних термальних вод у народному господарстві пов'язане з певними труднощами. Розчинені в термальних водах сірководень та вільна вуглекислота сприяють високій корозійній агресивності до металу. Необхідно також враховувати, що в трубопроводах та наземних комунікаціях при зниженні тиску може виділятися та накопичуватися такий вибухонебезпечний газ, як метан. У той же час, як зазначає Дворов І.М., дегазація термальних вод може багато в чому полегшити експлуатацію тих геотермальних родовищ, де виникають труднощі із відкладенням солей і корозією. Видобуток вуглеводневих газів з родовищ термальних вод не вигідний через малий їхній уміст унаслідок поганого розчинення у воді метану та його гомологів. Однак, при видобутку геотермальної води як носія термічної енергії вилучення вуглеводневих газів стає економічно вигідним навіть при порівняно малій концентрації цих газів.

Присутність у термальних водах вуглеводневих газів суттєво підвищує їхній енергетичний потенціал, і при концентрації газу близько 10 м^3 при н. у. на 1 м^3 води енергетичний еквівалент газу, залежно від глибини відбирання, може досягати термічного потенціалу термальних вод. Як показує практика, видобування газів доцільне навіть за вмісту супутніх вуглеводневих газів $1,4 \text{ м}^3$ при н.у. на 1 м^3 води [6].

Використання закручених потоків у техніці [7, 8] обумовлено можливістю створення в обертових потоках поля відцентрових сил, що істотно перевершують гравітаційні сили і викидають частинки з потоку, і збільшенням за рахунок обертання потоку довжини траєкторій частинок і крапель (часу контакту), що рухаються в ньому, порівняно з випадком поступального руху. У цьому випадку вдається отримати високий ступінь очищення, недосяжний звичайними методами.

Пристрої, в яких реалізуються закручені потоки, мають такі назви: відцентрові, циклонні, циклонно-вихрові і вихрові камери, труби вихрові, циклони і гідроциклони, вихрові сепаратори, вихрові промивачі тощо. Спільною рисою їх є наявність робочої камери (зазвичай, циліндричної чи конічної форми) і завихрювача потоку (зазвичай тангенціального чи осьового) [9, 10].

Відомий скрубєр Вентурі [11] містить корпус, батарею труб Вентурі,

зрошувальний пристрій та краплевідділювач. Недоліком такого апарату є високий гідравлічний опір, значний краплинонос.

Автором Савченко Є.А. [12] розроблено метод фрикційного нагрівання природного газу в енергетичному роздільнику, який дозволяє підвищувати ефективність процесу нагрівання та вилучити можливість утворення кристалогідратів у регуляторі тиску газу.

Авторами М.М. Лях, Є.В. Юр'єв, В.М. Вакалюк і Я.В. Солонічний [13] розроблено математичну модель сепаратора, в основі якої лежить інерційний механізм сепарації газорідинної суміші. На базі даної моделі отримано функціональні залежності коефіцієнта ефективності сепаратора від параметрів, які відіграють визначальну роль у технологічному процесі поділу газорідинної суміші на рідку та газову фази. Основним недоліком моделі є те, що вона надмірно спрощена і не враховує деякі процеси (конденсацію, коагуляцію і подрібнення крапель), які можуть відбуватися всередині апарату.

У роботі [14] у процесі вивчення проблеми забруднення водних ресурсів розроблено ефективне очищення стічних вод від механічних мінеральних домішок. В основу роботи поставлено завдання удосконалення прямооточієних гідроциклонів шляхом тангенціального підведення та тангенціального відведення рідини, що забезпечує стабільний гідродинамічний режим потоку та відсутність протитечії. Виконані дослідження показали високу ефективність затримання механічних мінеральних домішок (до 95 %) і значне збільшення зольності осаду.

Створення нових високоефективних і малогабаритних апаратів можна здійснити тільки при підвищенні інтенсивності процесів, що відбуваються в них шляхом використання нових технічних рішень. Ця задача може бути вирішена за рахунок створення нової конструкції вихрового турбулентного промивача, який очищує геотермальну рідину.

Мета роботи – розроблення конструкції сепаратора для ефективного очищення геотермальної рідини від розчиненого газу та механічних частинок.

Основна частина. Розроблено мультिवихровий турбулентний промивач (рис. 1, 2) для очищення геотермальної рідини від завислих та газоподібних домішок.

Газ, який очищується, подається в нижню камеру 1 патрубком 3, врізаним тангенціально до нижньої камери 1, а також каналом змінного перерізу 3 через щілину постійної висоти 4 з закручуванням за допомогою лопаткових завихрювачів 5, розміщених по зовнішній стороні корпусу. Закручений потік рідини в камері 1 очищується від твердих домішок. З нього також виділяються розчинені гази, які утворюють згори пристрою газонаповнений об'єм під високим тиском.

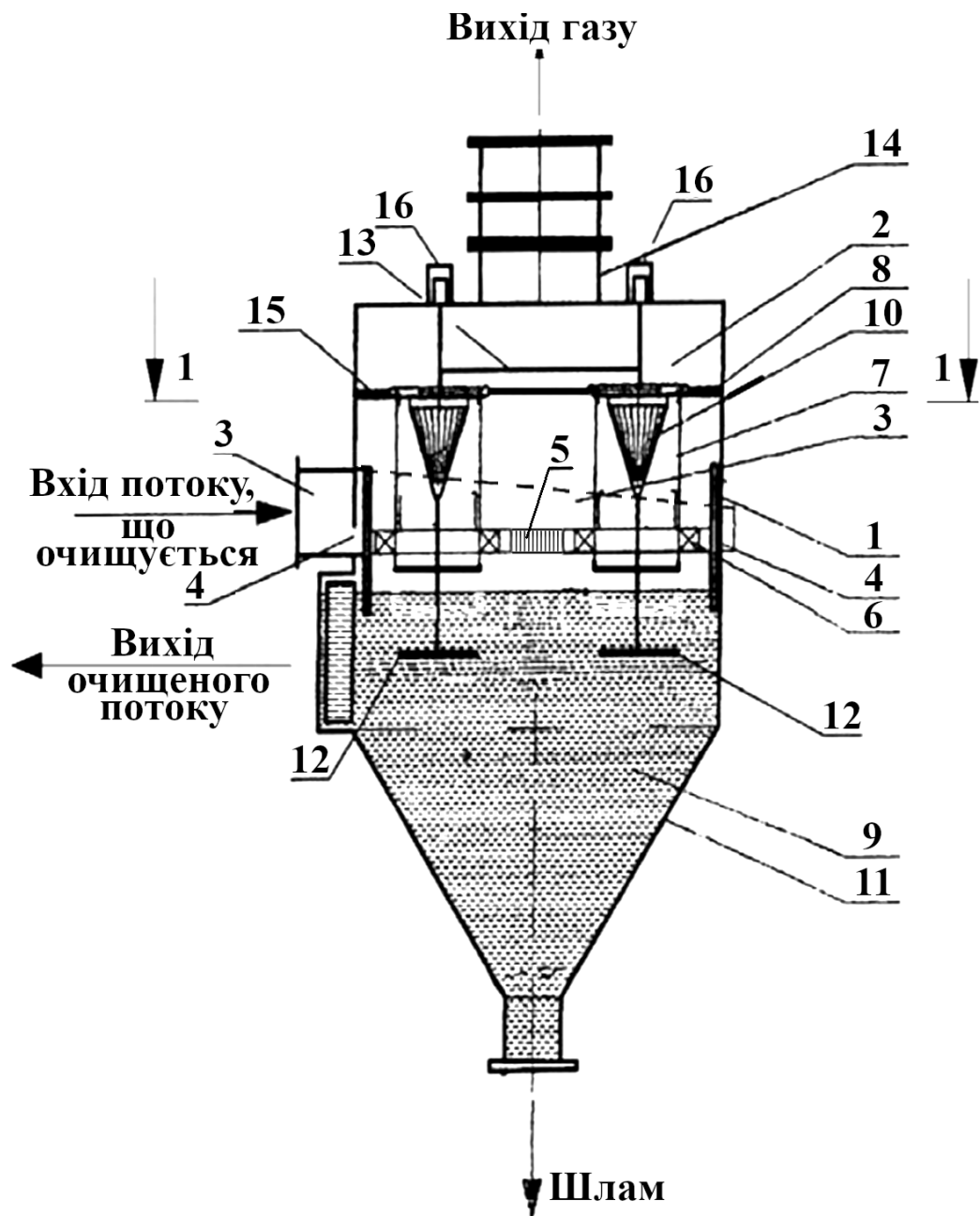


Рис.1. Пристрій для очищення геотермальної рідини:

1 – нижня камера, 2 – верхня камера, 3 – канал змінного перерізу, 4 – щілина однакової висоти, 5 – лопатки інерційного відділювача, 6 – лопаткові завихрювачі, 7 – вихровий турбулентний промивач, 8 – перекриття нижньої камер – рідина, 10 – конусний лопатковий краплевловлювач, 11 – бункер, 12 – горизонтальний диск, 13 – шток, 14 – патрубок, 15 – колектор, 16 – пристрій для вимірювання глибини зануреного диска

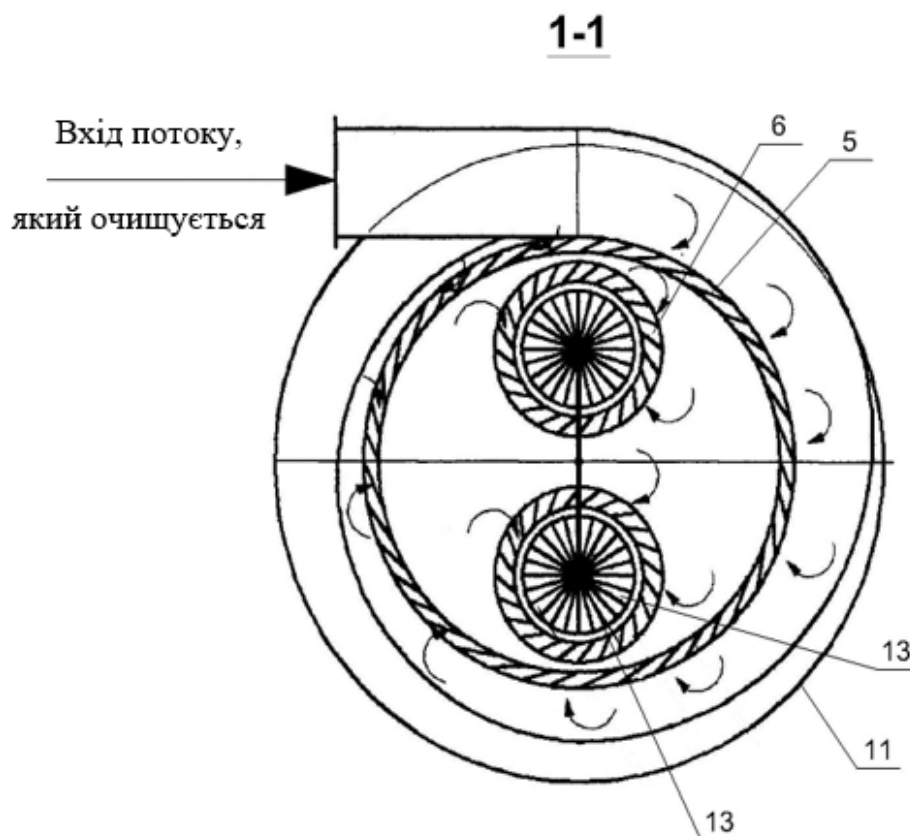


Рис. 2. Поперечний розріз апарата:
позначки див. рис. 1.

Вивільнені гази заходять крізь аналогічні до позиції 5 лопатеві завихрювачі 6, прикріплені вздовж периметру кожного модуля вихрового турбулентного промивача 7 вище рівня рідини мінімум на один діаметр модуля. Тиску газу у верхній частині апарата достатньо для ефективної роботи закручувачів 6. Потрапляючи вглиб модулів вихрових турбулентних промивачів 7, потік газу, який обертається, наводить рух на поверхню рідини 9. За рахунок обертання газу над нерухомим шаром рідини під дією доцентрових сил, рідина зрушується в приосьову зону і диспергується повітряним потоком з утворенням крапельно-зернистого шару, який постійно оновлюється. Виділені розчинні гази проходять крізь крапельно-зернистий шар, при цьому в результаті тепломасообміну здійснюється його очищення від зважених та газоподібних домішок. Під дією сили тяжіння надлишок рідини повертається вниз. Тверді домішки з рідини під дією сил тяжіння опускаються до бункера 11 і видаляється з апарата.

Витрата рідини, що рециркулює в модулях вихрових турбулентних промивачів 7, регулюється за рахунок зміни глибини занурення в рідину дисків 12 штоками 13 за допомогою пристроїв 16. При підйомі диска 9 штоком 10 питоме зрошення газу, який очищається, зростає і відповідно підвищується ефективність очищення газу. Газ який очищається і крапельна рідина потрапляють у зону робочої камери модуля вихрового турбулентного промивача

7, де відцентровими силами відокремлюється основна маса крапель, які виносяться. Остаточне очищення газу від крапель рідини проводиться за допомогою лопаткового краплєвловлювача 10. Далі газ проходить через патрубок 14 для видалення очищеного газу. Для обмивання корпусу від пилу, що налипає, служать колектори 15, крізь які подається вода або спеціальна рідина.

Випробування моделі за рис. 1 і рис. 2 показали, що дана конструкція забезпечує очищення від механічних частинок розміром 100-300 мкм та видалення розчинених газів на 95 %. Цього достатньо для забезпечення надійності експлуатації теплообмінного та технологічного обладнання.

Висновки. Розроблена конструкція сепаратора-турбулентного промивача геотермальної рідини забезпечує очищення від механічних частинок розміром 100-300 мкм та розчинених газів на 95 % задля надійної експлуатації теплообмінного та технологічного обладнання. Це досягнуто новою конструкцією апарата, що поєднує зону очищення рідини в нижній частині апарата та вихровий турбулентний промивач газів з диспергуванням рідини закрученим газовим потоком.

References

1. Razakov A.T. Teplofizychni protsesy pry formuvanni ta vykorystanni heotermalnykh resursiv. Diss. abstract. Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. 2007 (in Ukrainian)
2. Kortsenstein V.N. Rastvorenniye gazy podzemnoi gidrosfery Zemli. "Nedra" 1984. (in Russian)
3. Namiot A.Yu., Bondareva M.M. Rastvorimost gazov v vode pod davleniem. "Gostoptekhzdat", 1963. (in Russian)
4. Kortsenstein V.N. "Novyye dannyye o resursakh rastvorenykh gazov plastovykh vod krupnykh vodonapornykh sistem i ikh znachenie dlia otsenki prognoznykh zapasov nefli i gaza." Doklady AN SSSR. T. 215, №1, 1974, pp. 178-180. (in Russian)
5. Kissin I.H. Vostochno-Predkavkazskyy artezyanskyy basseyn. "Nauka", 1964. (in Russian)
6. Zorkin L.M., Kortsenstein V.N., Stadnyuk E.V. Uglevodorodnyye gazy plastovykh vod neftegazonosnykh basseynov – vozmozhnyye istochniki polucheniia uglevodorodov. "Doklady AN SSSR". T. 252, №3, 1980, pp. 681-683. (in Russian)
7. Khalatov A.A., Avramenko A.A., Shevchuk I.V. "Teploobmen i gidrodinamika v poliakh tsentrobeznykh massovykh sil". T.3. Zakruchennyye potoky. "ITTF", 2000. (in Russian)

8. Khalatov A.A., Avramenko A.A., Shevchuk I.V. Teploobmen y hydrodynamyka v polyakh tsentrobeznykh massovykh syl: T.4. Inzhenernoie i tekhnologicheskoe oborudovanie. "ITTF", 2000. (in Russian)
9. Prykhodko V.P., Prokhorov E.M., Sviridov V.P. "Rezultaty promyshlennykh ispytaniy batareinykh tsentrobeznykh separatorov ustanovok separatsii plastovogo gaza vysokogo davleniia". Ekologiya i zdorovie cheloveka. Okhrana vodnogo i vozdušnogo basseinov. Utilizatsiia otkhodov. Sbornik trudov IX mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 2001, pp. 258–265. (in Russian).
10. Volchkov E.P., Smulsky I.I. "Aerodinamika vikhrevoi kamery s tortsevim i bokovym vduvom. Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii", №2 (17), 1983, pp. 214-219. (in Russian)
11. "Katalog pyle-gazoochistnogo oborudovaniia". Mezhdunarodnyi fond konversii. Tsentr ekologicheskikh problem". 1990. – (in Russian)
12. Savchenko E.A. Friksionnoe nagrevanie pryrodnogo gaza v energeticheskom razdelitele. "ITTF", 2008. (in Russian)
13. Lyakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonichnyi Y.V. "Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertiinoho typu". Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch, № 1 (26), 1983, pp. 67–74. (in Ukrainian)
14. Levashova Yu.S. "Ochystka stichnykh vod vid mekhanichnykh mineralnykh domishok u priamotochnykh vykhrovykh aparatakh": Diss. abstract. Kharkivskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury, 2007. (in Ukrainian)

UDC 620.9; 666.9-13

Ph.D., prof. **Andriy Redko**,
andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273,
Sumy National Agrarian University
Ph.D., prof. **Ihor Redko**,
ihor.redko1972@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1556-0830,
Ukrainian State University of Railway Transport
Candidate of Architecture, PhD. **Artem Borodai**,
dimaboroday@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4221-0332,
Ph.D., senior lecturer **Serhii Andruh**,
sl_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-885X,
senior lecturer **Serhii Borodai**,
boroday1@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1281-7766,
Sumy National Agrarian University

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR CLEANING GEOTHERMAL FLUID FROM MECHANICAL IMPURITIES AND DISSOLVED GASES

Abstract. *The results of the development of technology and devices for cleaning geothermal fluid from mechanical impurities and dissolved gases are given. The presence of dissolved hydrocarbon gases (methane and heavy hydrocarbons up to 60-90 %) in thermal waters significantly increases their energy potential. However, the presence of dissolved CO₂, N₂, H₂S cause equipment corrosion. Therefore, degassing of thermal waters and cleaning from mechanical impurities allows increasing the reliability of exploiting of geothermal deposits. The technology provides purification of geothermal fluid from particles with a dispersion of 50 to 300 μm and carbonate-calcium mechanical impurities and removal of dissolved gases. The technology is based on the use of hydrodynamic processes of separation of impurities in the turbulent flow of a rotating liquid and gas. The device is equipped with many small-diameter vane swirlers and vortex turbulent washers. High tangential speed in swirlers ensures cleaning of liquid from impurities. Due to the rotation of the flow, the surface of the liquid is dispersed with the formation of a droplet-granular layer, through which the gas to be purified passes. When the pressure of the fluid in the device and swirlers is reduced, dissolved gases (methane, carbon dioxide, hydrogen sulfide) are released from the geothermal fluid. The final purification of the gases from the dripping liquid is carried out using conical vane washers. The device can be used in technologies of geothermal field development. Existing technologies do not solve the problem of protecting geothermal energy systems and devices from carbonate deposits. Testing the models showed that this design provides cleaning from mechanical particles with a size of 100-300 μm and removal of dissolved gases by 95 %. This is enough to ensure the reliability of operation of heat exchange and technological equipment.*

Keywords: mechanical impurities, turbulent flow, geothermal fluid, dispersion, hydrodynamic process, separation of solid impurities, geothermal deposit.

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 48

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

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

Підписано до друку 29.03.2024 Формат 60×84 1/6
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 4,48. обл. вид. арк. 4,65.
Наклад 100 прим. Замовлення № 161406

