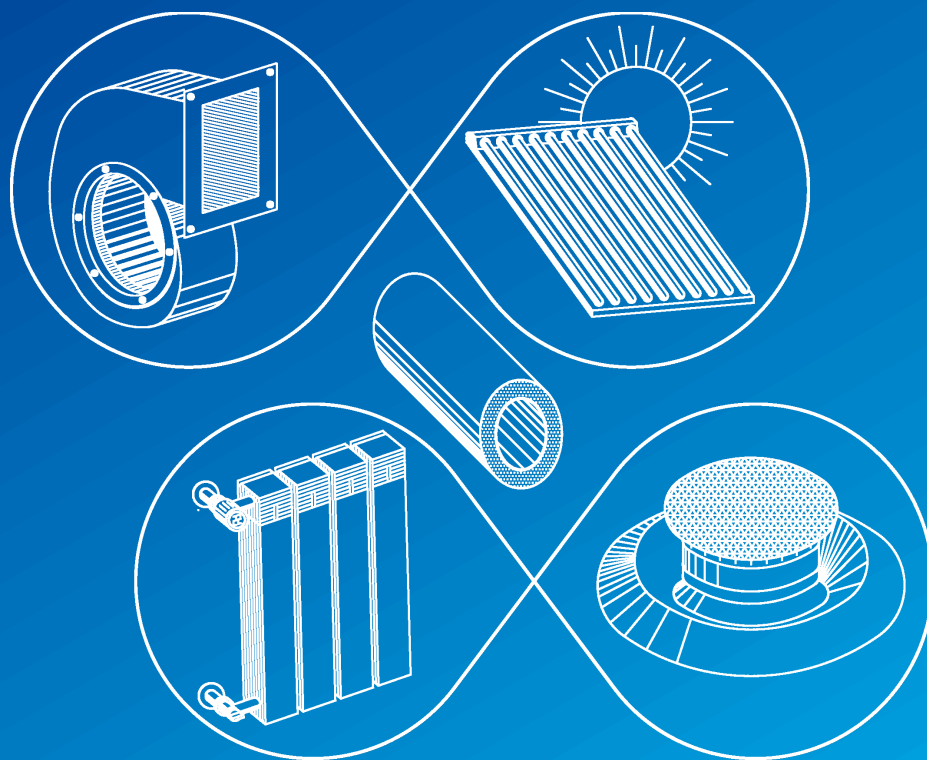


# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2022

Випуск 42



**Міжнародна науково-практична конференція**

**Екологія, ресурси, енергія**

**ERE-2022**

**23-25 листопада 2022 р.**

**КИЇВ 2022**

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 42

Kyiv 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

# **ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*заснований у 2001 році*

ВИПУСК 42

Київ 2022

УДК 697  
В29

ISSN 2409-2606

**Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:** науково-технічний збірник. – Вип. 42 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2022. – 48 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. І.О. Пєфтєва (відповідальний секретар); докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Міхайленко; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. екон. наук, доцент К. М. Предун; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професор Т. М. Ткаченко; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, ст. наук. співр. Г. В. Жук; докт. техн. наук, професор В. А. Кравець; докт. техн. наук, професор Г. Гавардашвілі (Грузія); докт. техн. наук, професор З. Гвішіані (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 27 червня 2022 р., протокол № 51.

Адреса редакційної колегії: Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теплогазопостачання і вентиляції та кафедра теплотехніки, Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, 03037, Україна.

тел. +380(44)245-48-33

© Київський національний університет  
будівництва і архітектури

## ЗМІСТ

<i>До відома авторів і читачів .....</i>	<i>5</i>
<i>Ю. Й. Франчук, І. О. Пефтева Відмінності у визначенні термінів та вимог безпеки в нормативних доку- ментах газопостачання.....</i>	<i>6</i>
<i>С. О. Алфьоров Дослідження паливно-повітряного потоку всередині вихрової топки з кип- лячим шаром із застосуванням спеціальної повітряно-розподільної насад- ки. ....</i>	<i>17</i>
<i>О. О. Синіло Підвищення ефективності використання водяних систем променевого опалення.....</i>	<i>22</i>
<i>В. А. Коновалюк, Ю. Й. Франчук Вплив теплоти згоряння на розрахунки при транспортуванні та спожив- ванні природного газу.....</i>	<i>27</i>
<i>О. М. Недбайло, І. К. Божко, В.О. Мартенюк Особливості аналітичного розрахунку параметрів теплопередачі через багатошарову огорожувальну конструкцію в нестационарному режимі.....</i>	<i>33</i>
<i>Ю. В. Човнюк, А. С. Москвітін, І. О. Пефтева Вдосконалення методів структурно-параметричної оптимізації в аналізі грунтових акумуляторів теплоти.....</i>	<i>38</i>

## CONTENTS

<i>Information for the authors and the readers .....</i>	<i>5</i>
<i>Y. Franchuk, I. Peftieva Differences in determination of terms and safety requirements in regulatory documents of gas supply.....</i>	<i>6</i>
<i>S. Alforov Investigation of the fuel-air flow inside a vortex furnace with a fluidized bed us- ing a special air-distributing nozzle.....</i>	<i>17</i>
<i>O. Synilo Improving the efficiency of using water radiant heating systems.....</i>	<i>22</i>
<i>V. Konovaliuk, Yu. Franchuk Influence of the heat of combustion on calculations during the transport and consumption of natural gas .....</i>	<i>27</i>
<i>O. Nedbailo, I. Bozhko, V. Marteniuk Improvement of the methods of structural-parametric optimization in the analy- sis of ground heat accumulators .....</i>	<i>33</i>
<i>Y.Chovniuk, A. Moskvitina, I. Peftieva Peculiarities of the analytical calculation of heat transfer parameters through a multi-layer enclosing structure in non-stationary mode.....</i>	<i>38</i>

## До відома авторів і читачів

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

В умовах воєнного часу під вий сирен, вибухи ракет, безпілотників і бомб, вдома, в університетах та в бомбосховищах ми продовжуємо працювати над випуском Збірника. Відновлення зруйнованих міст і сіл стає першочерговим завданням. При цьому головними умовами стане швидкість відбудови, енергоефективність і безпека, зокрема енергетична. Висока науковість такого будівництва вимагає від нас не зупинятися, а продовжувати розробляти енергоефективні рішення в галузі вентиляції, освітлення та теплогазопостачання і суміжних галузях.

Продовжуємо публікацію статей за матеріалами Третьої Міжнародної науково-практичної конференції “Довкілля, ресурси, енергія” ERE-2022 факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури. Сподіваємося провести цей захід вчасно.

Звертаємо увагу на неухильне дотримання вимог до рукописів, розміщених на сайті <http://vothp.knuba.edu.ua/about/submissions>.

Особливо зараз просимо максимально зосередитися на виконанні цих вимог. Адже рецензування, коригування та верстання відбувається в дуже складних умовах.

## Information for the authors and the readers

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

During the war, we continue to work on the Collection under the accompaniment of sirens, missiles, drones and bombs explosions, at home, in universities, and in bomb shelters. Restoring destroyed cities, towns and villages is becoming a priority. The main conditions will be the speed of reconstruction, energy-efficiency and security, in particular energy. The high knowledge intensity of such construction requires us not to stop, but to continue to develop energy efficient solutions in the field of ventilation, illumination, heat-gas supply and related industries.

We continue to publish articles based on the materials of the Third International Scientific and Practical Conference "Environment, Resources, Energy" ERE-2022, Faculty of Engineering Systems and Ecology, Kyiv National University of Construction and Architecture. We hope to hold this event in time.

We draw your attention to the strict compliance with the Requirements for manuscripts at the site <http://vothp.knuba.edu.ua/about/submissions>.

Especially now, we ask you to focus as much as possible on fulfilling these requirements. After all, reviewing, correcting and compiling takes place in very difficult conditions.

УДК 696.2

## Відмінності у визначенні термінів та вимог безпеки в нормативних документах газопостачання

Ю.Й. Франчук<sup>1</sup>, І.О. Пефтева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, franchuk196405@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-7910-8705

<sup>2</sup>ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, piefteva.io@knuba.edu.ua  
ORCID:0000-0002-8858-9010.

*Анотація.* У статті проведено дослідження термінів та вимог діючих нормативних документів що використовуються при газифікації різних об'єктів і при їх технічному обслуговуванні та ремонті. Поставлена задача вирішується шляхом порівняння нормативних документів. В роботі проаналізовано діючі нормативні документи та проведено аналіз термінів та визначень, властивих галузі газопостачання, таких як природний газ, якість газу, облік газу, система газопостачання, газонебезпечні роботи, технічні смуги, тиск, цистерна, балон та ін. Показано різницю тлумачення одних і тих самих термінів в діючих нормативних документах, різні вимоги, доповнення деяких з них іншими. Стаття може стати у нагоді працівникам, що розслідують нещасні випадки або працюють у видобувній галузі, виконують газонебезпечні роботи, людям, що готуються до складання іспитів з охорони праці та їхньої подальшої роботи.

*Ключові слова:* нормативний документ, терміни, визначення, природний газ, газонебезпечні роботи, якість газу, система газопостачання.

**Вступ.** В процесі виробництва для нашої держави важливо не тільки об'єм створеного ВВП, низькі затрати при цьому але і збереження життя і здоров'я робітників в процесі виробництва. Україна не тільки розвиває власну нормативну базу ставлячи на перше місце людину але також активно імплементує законодавство ЄС і передових країн, взявши курс на інтеграцію в світове співтовариство. Відповідно до Конституції України державна політика спрямована на створення належних, безпечних і здорових умов праці, запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням.

**Актуальність дослідження.** Життя та здоров'я людини в процесі виробництва дуже важливий фактор. Згідно діючих нормативних актів роботодавець зобов'язаний створити на кожному робочому місці, в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників. Проте, аналізуючи діючі нормативні акти, можна побачити що в різних діючих документах питання трактується неоднаково. Замість доповнення документів один одним, конкретизування вимог, створення в цілому цілісної та однозначної картини виникає неточність, двоякість розуміння, складність і часом неможливість виконання діючих вимог. Така ситуація далеко не покращує стан питання в цілому.

За 2020 рік в Україні зареєстровано 6646 нещасних випадків пов'язаних з виробництвом. 393 випадки були смертельними. Порівняно з 2019 роком кількість страхових нещасних випадків збільшилась з 4394 випадків на 51,3%, кількість смертельно травмованих осіб зменшилась з 410 випадків на 4,1% (рис.1). Розслідування нещасних випадків є складнішим через відмінності та протиріччя нормативних вимог.

**Останні дослідження та публікації.** З початком незалежності нашої держави України був прийнятий Закон України «Про охорону праці» і введений в дію 24 листопада 1992 року. В подальшому цей Закон отримувал доповнення та зміни та зараз діє у редакції від 21 листопада 2002 року. З часом кількість діючих радянських нормативних актів зменшується та зростає кількість прийнятих державою України: ДБН-В.2.5-20:2018 Газопостачання, «Кодекс газорозподільних систем», «Технічний регламент природного газу», «Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання», «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском», «Правила безпеки систем газопостачання» та ін. Життя та євроінтеграційні процеси вимагають адаптувати законодавство до європейських та світових вимог, усувати протиріччя та неточності в нормативній базі.



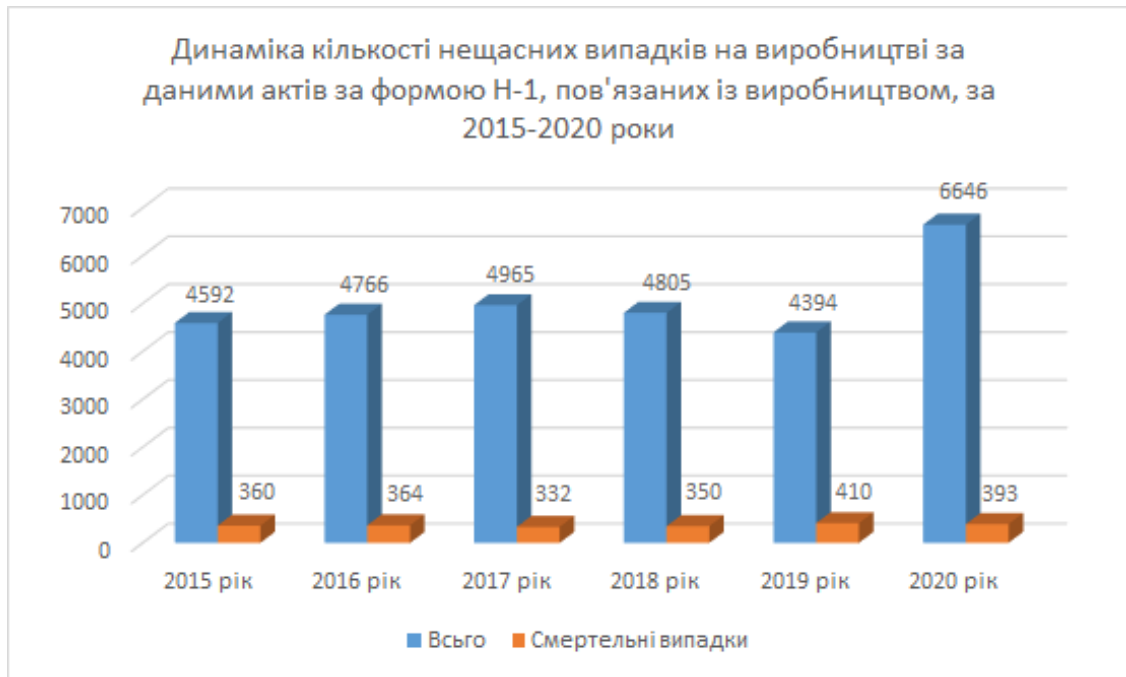


Рис. 1 Динаміка кількості нещасних випадків у 2015-2020 роках

Формулювання цілей статті. Метою статті є порівняння різних діючих в Україні нормативних актів, щоб виявити відмінності або доповнення одного нормативного акту іншим.

**Основна частина.** Закон України «Про охорону праці» визначає основні положення щодо реалізації конституційного громадян на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації або уповноваженим ним органом (далі — власник) і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні. Інші нормативні акти мають доповнювати і розкривати весь спектр питань, розглянутих у

Законі. Розглянемо декілька термінів, що відображені у різних документах і порівняємо їх.

У табл.1 розглядається природний газ. Протиріч у тлумаченні майже нема, але можна доповнити кожний з нормативних документів та узагальнюючи сформулювати: «Природний газ – корисна копалина, що являє собою суміш вуглеводнів, переважно метану, та неуглеводневих компонентів, що перебуває у газоподібному стані за стандартних умов (тиск - 760 міліметрів ртутного стовпа і температура - 20 градусів за Цельсієм) і є товарною продукцією. Також біогаз або інші види газу з альтернативних джерел, які за своїми фізико-технічними характеристиками відповідають стандартам на природний газ».

Таблиця 1

**Природний газ**

Нормативний документ	Визначення
ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020	Суміш метану як основного компонента з іншими вуглеводнями та неуглеводневими компонентами, яка відповідає вимогам стандартів та нормативно-правових актів стосовно природного газу, підготовленого для застосування в якості палива для комунально-побутового та промислового призначення [1].
Кодекс газорозподільних систем	Термін «природний газ» охоплює біогаз або інші види газу з альтернативних джерел, які за своїми фізико-технічними характеристиками відповідають стандартам на природний газ [2].
Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання	Газ – корисна копалина, яка являє собою суміш вуглеводнів та неуглеводневих компонентів, перебуває у газоподібному стані за стандартних умов (тиску 760 мм ртутного стовпа і температури 20 °C і є товарною продукцією [3].

Продовження табл. 1

Нормативний документ	Визначення
Закон України «Про ринок природного газу»	Природний газ, нафтовий (попутний) газ, газ (метан) вугільних родовищ та газ сланцевих товщ, газ колекторів щільних порід, газ центрально-басейнового типу (далі - природний газ) - суміш вуглеводнів та неуглеводневих компонентів, що перебуває у газоподібному стані за стандартних умов (тиск - 760 міліметрів ртутного стовпа і температура - 20 градусів за Цельсієм) і є товарною продукцією [4].
Технічний регламент природного газу	Складна газова суміш вуглеводнів, переважно метан, яка також містить етан, пропан і вищі вуглеводні в значно меншій кількості, а також деякі негорючі гази, наприклад, азот і діоксид вуглецю та яка відповідає вимогам цього Технічного регламенту, і є товарною продукцією [5].

У «Правилах безпеки систем газопостачання» (табл.2) узагальнено обмеження використання ділянок вздовж газопроводів до відстані 2 м та до відстані 10 м по периметру ГРП та ШРП. У «Кодексі газорозподільних систем», на відміну від «Правил безпеки систем газопостачання» ширина технічних смуг (або охорон-

ної зони) навколо газопроводів, ГРМ, ГРП та ШРП, залежать від їх тиску. Однаково нормуються ширина умовної ділянки землі вздовж газопроводів низького тиску (2 м) та навколо ГРП, ШРП, ВОГ при тиску газу на вводі до 0,6 МПа.

Таблиця 2

Технічні смуги

Нормативний документ	Визначення
Кодекс газорозподільних систем	<p>Охоронна зона об'єктів газорозподільної системи – територія, обмежена умовними лініями, уздовж наземних, надземних і підземних газопроводів та їх споруд по обидва боки від крайніх елементів конструкції розподільних газопроводів та по периметру наземних споруд на визначеній відстані, на якій обмежується провадження господарської та іншої діяльності.</p> <p>Проведення ремонтних, будівельних та земляних робіт на відстані менше ніж 15 м від ГРМ без дозволу на порушення об'єктів благоустрою, який видається відповідним виконавчим органом сільської, селищної, міської ради за місцем проведення робіт, та письмового погодження Оператора ГРМ – не допускається.</p> <p>З метою забезпечення безпечної експлуатації об'єктів ГРМ встановлюються охоронні зони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) вздовж газопроводів високого тиску I категорії – у вигляді ділянки землі, обмеженої умовними лініями, що проходять в 10 метрах від осі газопроводу по обидва боки;</li> <li>2) вздовж газопроводів високого тиску II категорії – у вигляді ділянки землі, обмеженої умовними лініями, що проходять в 7 метрах від осі газопроводу по обидва боки;</li> <li>3) вздовж газопроводів середнього тиску – у вигляді ділянки землі, обмеженої умовними лініями, що проходять в 4 метрах від осі газопроводу по обидва боки;</li> <li>4) вздовж газопроводів низького тиску – у вигляді ділянки землі, обмеженої умовними лініями, що проходять в 2 метрах від осі газопроводу по обидва боки;</li> <li>5) вздовж підводних переходів – у вигляді ділянки водного простору від водної поверхні до дна, укладеного між паралельними площинами, віддаленими від осей крайніх ниток переходів на 50 метрів по обидва боки;</li> <li>6) навколо будівель ГРП, ШРП, ВОГ – у вигляді ділянки землі, обмеженої умовною лінією, віддаленої від зовнішніх стін будинку (шаф) ГРП, ВОГ, ШРП при тиску газу на вводі в ГРП, ШРП, ВОГ до 0,6 МПа на 10 метрів у всі сторони, а при тиску газу на вводі в ГРП, ШРП, ВОГ понад 0,6 до 1,2 МПа – на 15 м у всі сторони [2].</li> </ol>

Продовження табл. 2

Нормативний документ	Визначення
Правила безпеки систем газопостачання	<p>Технічні смуги – технічні смуги на поверхні землі вздовж траси газопроводу завширшки 2 м з обох сторін від зовнішньої стінки газопроводу в плані, в межах яких не допускається складання юридичними і фізичними особами матеріалів і обладнання, садіння дерев та влаштування будь-яких споруд і будівель (в тому числі тимчасових).</p> <p>З метою забезпечення безпечних умов експлуатації та виключення можливості пошкодження газорозподільної системи вздовж її траси в межах охоронної зони шириною 2 м з обох боків від зовнішньої стінки газопроводу в плані не допускаються:</p> <p>обмеження доступу обслуговуючого персоналу у світлу пору доби, а при аварійній ситуації - цілодобово;</p> <p>складування матеріалів і устаткування;</p> <p>ведення земляних та будівельно-монтажних робіт;</p> <p>садіння дерев;</p> <p>улаштування стоянок автотранспорту, гаражів та інших споруд, у тому числі тимчасових.</p> <p>Технічні смуги для ГРП, ШГРП дорівнюють не менше ніж 10 м по периметру цих споруд [6].</p>

У таблиці 3 порівнюємо тлумачення поняття «балон» у «Правилах безпеки систем газопостачання» і «Правилах охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском». Відмінності складаються у тому, що в одному випадку вказано об'єм та тиск посудини, а в іншому – її конструктивні особливості, та у різновиди газів, для яких можуть бути використані балони.

У таблиці 4 розглядаються газонебезпечні

роботи. Відмінності складаються у:

- відсутності у першому та наявності у другому нормативних документах розподілення газонебезпечних робіт на категорії;
- у «Правилах безпеки систем газопостачання» допускається проводити деякі роботи без керівництва спеціаліста та без наряду допуску (це пояснюється часом прийняття даного документу).

Таблиця 3

**Балон**

Нормативний документ	Визначення
Правила безпеки систем газопостачання	Балон - посудина, що працює під тиском до 1,6 кгс/см <sup>2</sup> , ємністю до 100 дм <sup>3</sup> , що призначена для транспортування, зберігання і використання зріджених газів [6].
Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском	Балон - посудина, яка має одну або дві горловини для встановлення вентилів, фланців або штуцерів, призначена для перевезення, зберігання і використання стиснених, зріджених або розчинених під тиском газів[7].

Таблиця 4

**Газонебезпечні роботи**

Нормативний документ	Визначення
Правила безпеки систем газопостачання	<p>Газонебезпечні роботи - роботи, під час виконання яких є або може бути виділення в робочу зону вибухо- і пожежонебезпечної або шкідливої пари, газів та інших речовин, здатних викликати вибух, загорання, в кількостях, що перевищують граничнодопустиму концентрацію, а також роботи при недостатньому вмісті кисню (об'ємна частка нижче ніж 20% у повітрі).</p> <p>Газонебезпечні роботи, повинні виконуватися під керівництвом спеціаліста, за винятком підключення без застосування зварювання до діючих газопроводів низького тиску введів в будинки діаметром не більше 50 мм, підключення або від'єднання без застосування зварювання окремих побутових газових приладів і апаратів, введення в експлуатацію індивідуальних балонних установок, проведення ремонтних робіт без застосування зварювання і газового різання на</p>

Нормативний документ	Визначення
	<p>газопроводах низького і середнього тиску діаметром не більше 50 мм, наповнення ЗВГ резервуарів і балонів у процесі їх експлуатації, огляду, ремонту і вентиляції колодязів, перевірки і видалення конденсату з конденсатозбірників, зливу невідпарених залишків ЗВГ з резервуарів і балонів, заправки газобалонних автомашин, технічного обслуговування внутрішніх газопроводів і газовикористовувальних установок, у тому числі ГРП, ГНС, АГЗС і установок ЗВГ, а також обслуговування діючих приладів і апаратів у житлових і громадських будинках. Керівництво вказаними роботами доручається найбільш кваліфікованому працівнику. Газонебезпечні роботи необхідно виконувати бригадою у складі не менше двох працівників. Уведення в експлуатацію індивідуальних ГБУ, а також окремих газових приладів і апаратів у житлових будинках, технічне обслуговування та ремонт газового обладнання житлових і громадських будинків допускається виконувати одним працівником.</p> <p>Газорозподільним підприємством допускається проводити технічний огляд ГРП, які розташовані в окремих будівлях, вбудованих і прибудованих до будов з відокремленим входом, одним працівником за інструкцією, яка містить додаткові заходи безпеки. Огляд ГРП, обладнаних системами телеметричного контролю, розташованими в шафах, на відкритих площадках, а також ГРУ може проводитися одним працівником.</p> <p>Ремонтні роботи в колодязях, тунелях, траншеях і котлованах глибиною понад 1 м, колекторах і резервуарах повинні виконуватися бригадою у складі не менше трьох працівників.</p>
Правила безпеки систем газопостачання	Роботи з локалізації і ліквідації аварій проводяться без наряду-допуску та до усунення прямої загрози життю людей і пошкодженню матеріальних цінностей [6].
Типовая инструкция по организации безопасного проведения газоопасных работ	<p>К газоопасным относятся работы, связанные с осмотром, чисткой, ремонтом, разгерметизацией технологического оборудования, коммуникаций, в том числе работы внутри емкостей (аппараты, сушильные барабаны, печи сушильные, реакторы, резервуары, цистерны и другое аналогичное оборудование, а также коллекторы, тоннели, колодцы, приямки и другие аналогичные места), при проведении которых имеется или не исключена возможность выделения в рабочую зону, определяемую в соответствии с ГОСТ 12.1.005-76, взрыво- и пожароопасных или вредных паров, газов и других веществ, способных вызвать взрыв, загорание, оказать вредное воздействие на организм человека, а также работы при недостаточном содержании кислорода (объемная доля ниже 20 %)</p> <p>На предприятии по каждому цеху (производству) должен быть разработан перечень газоопасных работ. В перечне должны быть отдельно указаны газоопасные работы:</p> <p>I — проводимые с оформлением наряда-допуска;</p> <p>II — проводимые без оформления наряда-допуска, но с обязательной регистрацией таких работ перед их началом в журнале;</p> <p>III — вызванные необходимостью ликвидации или локализации возможных аварийных ситуаций и сбоев.</p> <p>Каждая газоопасная работа, выполняемая с оформлением наряда-допуска или регистрируемая в журнале учета, состоит из двух этапов: подготовка объекта к проведению газоопасной работы; непосредственное проведение газоопасной работы. Ответственным за подготовку объекта к проведению газоопасной работы назначается в порядке, определенном п. 2.4 настоящей инструкции, инженерно-технический работник цеха, в ведении которого находится эксплуатационный персонал данного объекта. Ответственным за проведение газоопасной работы назначается в порядке, так же определенном п. 2.4, инженерно-технический работник, не занятый на период проведения такой работы ведением технологического процесса и знающий способы безопасного Проведения газоопасных работ. В случае выполнения работы газоспасателями или работниками сторонних организаций ответственным за их проведение назначается инженерно-технический работник, допущенный к руководству газоопасными работами и в ведении которого находятся исполнители газоопасных работ [8].</p>

Щодо обліку газу (табл.5): в ДБН-В.2.5-20:2018 вказано дозволені місця розташування приладів обліку газу та роз'яснено конструктивні особливості встановлення приладів обліку

газу. В інших нормативних документах – пояснення терміну облік газу та призначення приладів для обліку газу.

Таблиця 5

Облік газу

Нормативний документ	Визначення
Правила безпеки систем газопостачання	Лічильник газу – засіб вимірювальної техніки, який використовується для вимірювання, запам'ятовування та відображення об'єму газу, що проходить через нього Вузол обліку газу - сукупність засобів вимірювальної техніки та допоміжних засобів, що призначені для вимірювання, реєстрації результатів вимірювання та розрахунків об'єму газу, приведеного до стандартних умов його стану [6].
Кодекс газорозподільних систем	Обчислювач об'єму газу – засіб вимірювальної техніки, який перетворює вихідні сигнали вимірювальної інформації від вимірювального перетворювача перепаду тиску на звужуючому пристрої (напірній трубці, тощо) та/або від вимірювального перетворювача об'єму газу за робочих умов (лічильника газу тощо), від вимірювальних перетворювачів тиску та температури газу, що протікає у вимірювальному трубопроводі, та обчислює об'єм газу за стандартних умов; Обсяг (кількість) енергії природного газу - кількість теплової енергії (МДж, Гкал, кВт·год),
Кодекс газорозподільних систем	яка виділяється під час повного згоряння певного об'єму природного газу; Об'єм природного газу - кількість газу (м. куб.), виміряна вузлом обліку природного газу або визначена в результаті інших регламентних процедур, передбачених цим Кодексом; Лічильник газу – засіб вимірювальної техніки, який використовується для вимірювання, запам'ятовування та відображення об'єму (обсягу) природного газу, що проходить через нього, та є складовою комерційного (дублюючого) вузла обліку; Коректор об'єму газу – сукупність засобів вимірювальної техніки, які вимірюють тиск і температуру газу, що протікає у вимірювальному трубопроводі, обчислюють об'єм газу за стандартних умов, перетворюючи вихідні сигнали від лічильника газу; Комерційний вузол обліку/комерційний ВОГ – вузол обліку природного газу, організований відповідно до вимог цього Кодексу для комерційного обліку природного газу при визначенні об'єму (обсягу) передачі та розподілу (споживання/постачання) природного газу в точці комерційного обліку; Комерційний вузол обліку/комерційний ВОГ – вузол обліку природного газу, організований відповідно до вимог цього Кодексу для комерційного обліку природного газу при визначенні об'єму (обсягу) передачі та розподілу (споживання/постачання) природного газу в точці комерційного обліку; Вузол обліку природного газу/вузол обліку/ВОГ – сукупність засобів вимірювальної техніки, зокрема лічильник газу або звужуючий пристрій, та допоміжних засобів, призначених для вимірювання, реєстрації результатів вимірювання та розрахунків об'єму природного газу, зведених до стандартних умов, визначених законодавством [2].
ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020	Комерційний вузол обліку газу – термін вживається у значенні, наведеному в Кодексі газорозподільних систем. Інтелектуальна система обліку природного газу – апаратно-програмні автоматизовані системи обміну даними, забезпеченні обладнанням та комунікаційними засобами для передачі інформації за допомогою мережових технологій з метою моніторингу та здійснення розрахунків за природний газ. Вузол обліку газу – термін вживається у значенні, наведеному в Правилах безпеки систем газопостачання. Місце розташування вузлів обліку газу, крім тих, що складаються з побутових лічильників газу, вимоги до якого встановлюються нормативно-правовими і нормативно-технічними актами, повинне бути максимально близько до точки розмежування газопроводів споживача та операторів газорозподільних мереж наскільки це технічно можливо. Між вузлом обліку газу та точкою розмежування газопроводів споживача та

Нормативний документ	Визначення
ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020	<p>операторів газорозподільних мереж не повинне встановлюватись газове обладнання, крім вимикаючих пристроїв (запірної арматури).</p> <p>Вузли обліку газу, у тому числі що складаються з побутових лічильників газу (далі – прилади обліку), повинні встановлюватися:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- у газифікованому приміщенні;</li> <li>- у нежитловому приміщенні газифікованого житлового будинку, що має природну вентиляцію;</li> <li>- у суміжному з газифікованим приміщенням виробничого будинку та котельної, сполученими з відкритим отвором;</li> <li>- у ГРП, ШГРП, ГРПБ;</li> <li>- зовні будинку.</li> </ul> <p>Некомерційним (технологічним) обліком кількості газу повинні бути забезпечені:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- окремі населені пункти, цехи, дільниці, агрегати, що мають розрахункове річне споживання понад 200 тис. м<sup>3</sup> природного газу або еквіваленту за тепловим ефектом кількість скрапленого газу;</li> </ul> <p>усі водогрійні котли з тепловою продуктивністю понад 1 Гкал/год та парові котли продуктивністю понад 1 т/год [1].</p>
Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання	<p>Комерційний вузол обліку газу - вузол обліку газу, за даними якого сторонами договору на постачання газу (далі - договір) оформлюються акти приймання-передачі газу і здійснюються взаєморозрахунки.</p> <p>Комерційний облік газу - визначення кількості протранспортованого газу розподільними мережами та обсягів його реалізації за актами звітності, підготовлених на підставі даних комерційних вузлів обліку газу [3].</p>
Закон України «Про ринок природного газу»	<p>Постачання природного газу споживачам здійснюється за умови наявності вузла обліку природного газу. Побутові споживачі у разі відсутності приладів обліку природного газу споживають природний газ за нормами, встановленими законодавством, до термінів, передбачених у частині першій статті 2 Закону України "Про забезпечення комерційного обліку природного газу".</p> <p>Результати вимірювань вузла обліку природного газу можуть бути використані за умови забезпечення єдності вимірювань.</p> <p>Вимоги до складових частин вузла обліку природного газу, правил експлуатації приладів обліку, порядку вимірювання обсягів та визначення якості природного газу визначаються технічними регламентами та нормами, правилами і стандартами, що встановлюються і затверджуються центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування та реалізацію державної політики в нафтогазовому комплексі [4].</p>

В таблиці 6 порівнюємо описи нормальних та стандартних умов. В міждержавних розрахунках та при розрахунках із споживачами використовуються умови по ГОСТ 2939-63. Таким чином, маса кубометра газу за ГОСТ 2939-63 дещо менше, ніж при "хімічних" нормальних умовах.

Іноді плутають нормальні умови зі стандартними, вважаючи, що ГОСТ визначає нормальні умови, і робиться висновок про неоднозначність терміну "нормальні умови". Насправді ГОСТ 2939-63 ніяк не визначає і не згадує нормальні умови.

Стандартні умови у більшості випадків використовуються для обліку витрати газу, а фі-

зико-хімічні властивості газу (густина, тертя та ін.) визначені за нормальних умов.

У таблиці 7 порівняно ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020, Правила безпеки систем газопостачання, Закон України «Про ринок природного газу», Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання та Технічний регламент природного газу щодо пояснення терміну «система газопостачання».

Правила безпеки систем газопостачання дають посилання на ДБН-В.2.5-20:2018 і показують технічну сторону цього питання, а в інших відображено майнову.

Таблиця 6

## Нормальні умови та стандартні умови

Нормативний документ	Визначення
Технічний регламент природного газу	- нормальні умови – умови, які використовують для порівняння газів з різними експлуатаційними характеристиками. За нормальних умов абсолютний тиск газу дорівнює 101,325 кПа, температура газу – 273,15 К (0 °С); - стандартні умови – стандартні умови температури, тиску та вологості (стан насичення), що використовують для вимірювань та обчислень властивостей природного газу. За стандартних умов для визначення обсягу газу: абсолютний тиск – 101,325 кПа; температура – 293,15 К; для визначення нижчої теплоти згоряння: абсолютний тиск – 101,325 кПа, температура згоряння – 298,15 К, температура вимірювання – 293,15 К [5].
Справочник по газоснабженню и использованию газа	Объем газов $V$ измеряют в кубических метрах ( $m^3$ ). Вследствие того, что объем газов сильно изменяется при нагревании, охлаждении и сжатии, за его единицу принимают $1 m^3$ газа при нормальных условиях (температура 0 °С, давление 101,3 кПа). Именно для указанных условий определяют основные характеристики газов и выполняют теплотехнические расчеты. При учете расхода газов для коммерческого (финансового) расчета за единицу объема принимают $1 m^3$ при стандартных условиях (температура 20°С, давление 101,3 кПа, влажность 0).[10].
ГОСТ 2939-63	Объем газов должен приводиться к следующим условиям: а) температура 20 °С (293,15 °К); б) давление 760 мм рт. ст. (101325 Н/м); в) влажность равна 0 [9].

Таблиця 7

## Система газопостачання

Нормативний документ	Визначення
ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020 Правила безпеки систем газопостачання	Система газопостачання - технічний комплекс, до складу якого входять: - газопроводи і споруди на них; - газовикористовуючі установки, резервуарні, групові та індивідуальні установки зріджених вуглеводневих газів, а також газифіковані житлові та громадські будинки; - газорегуляторні пункти та установки; - вузли обліку газу; - газифіковані промислові, сільськогосподарські та інші підприємства, котельні; - засоби електрохімічного захисту від корозії; - допоміжне технологічне обладнання, що забезпечує роботу системи газопостачання.[1,6].
Закон України «Про ринок природного газу»	Газорозподільна система - технологічний комплекс, що складається з організаційно і технологічно пов'язаних між собою об'єктів, призначених для розподілу природного газу від газорозподільних станцій безпосередньо споживачам; газотранспортна система - технологічний комплекс, до якого входить окремий магістральний газопровід з усіма об'єктами і спорудами, пов'язаними з ним єдиним технологічним процесом, або кілька таких газопроводів, якими здійснюється транспортування природного газу від точки (точок) входу до точки (точок) виходу [4].
Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання	Газорозподільні мережі (розподільні газопроводи) - майновий виробничий комплекс, який складається з організаційно і технічно пов'язаних об'єктів, призначених для транспортування газу від газорозподільних станцій до споживачів [3].
Технічний регламент природного газу	Постачальник природного газу – розповсюджувач, який на підставі ліцензії здійснює діяльність із постачання природного газу чи розповсюджувач, який у свою чергу надає природний газ у вигляді стисненого або зрідженого природного газу [5].

В Правилах безпеки систем газопостачання визначення «технічного обслуговування»

(табл.8) більш конкретизовано, а в Правилах охорони праці під час експлуатації обладнання,

що працює під тиском це питання розглядається в комплексі передбачуваних заходів.

В таблиці 9 у порівнянні із ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020 Правила безпеки систем газопостачання - в Технічному регламенті передбачено з 01.01.2025 року тиск, що подається до побутових газових приладів, втримувати в межах від 0,0017 (0,0007) МПа до 0,0025 (0,003) МПа, що значно покращить роботу побутових газових приладів.

Визначення «цистерна» (табл.10) у нормативних документах подібні, а відмінності

складаються у різних засобах пересування та у можливості транспортування окрім газоподібних та рідких – зріджених речовин.

Якість газу (табл.11) в Україні до 01.01.2022 визначалася за параметрами, що наведені в ГОСТ 5542-87 (зараз не чинний). Перелічені нормативні документи відображають параметри якості природного газу більш розгорнуто, подібно до нормативних документів країн Європейського Союзу.

Таблиця 8

Технічне обслуговування

Нормативний документ	Визначення
Правила безпеки систем газопостачання	Технічне обслуговування – системи обходів (оглядів), ремонтів, які дають змогу утримувати обладнання в справному стані. При технічному обслуговуванні здійснюються контроль за технічним станом, перевірка на загазованість, виявлення місць витоку газу, очищення, змащення, регулювання та інші операції з утримання працездатності і справності системи газопостачання[6].
Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском	Технічне обслуговування - комплекс технічних і організаційних заходів, які здійснюються в процесі експлуатації обладнання під тиском з метою забезпечення необхідної ефективності виконання ним заданих функцій[7].

Таблиця 9

Тиск

Нормативний документ	Визначення
ДБН-В.2.5-20:2018 зі зміною 17.02.2020	Газопроводи в залежності від тиску газу, що транспортується ними, поділяються: - газопроводи високого тиску I категорії – при робочому тиску газу від 0,6 МПа до 1,2 МПа для природного газу та газоповітряних сумішей і до 1,6 МПа – для СВГ;[1]; - газопроводи високого тиску II категорії – при робочому тиску газу від 0,3 МПа до 0,6 МПа; - газопроводи середнього тиску – при робочому тиску газу від 0,005 МПа до 0,300 МПа; - газопроводи низького тиску – при робочому тиску газу до 0,005 МПа. Розрахункові сумарні втрати тиску газу в газопроводах низького тиску (від джерела газопостачання до найбільш віддаленого приладу) приймаються не більше 180 даПа, у тому числі і розподільних газопроводах 120 даПа, газопроводах вводах і внутрішніх газопроводах – 60 даПа. Для садибної забудови розподіл розрахункових втрат допускається приймати в розподільних газопроводах 150 даПа, газопроводах вводах та внутрішніх газопроводах – 30 даПа[1].
Правила безпеки систем газопостачання	Максимальний робочий тиск газу після регулятора тиску, що подає газ побутовим газовим приладам, встановлюється залежно від номінального перед приладами, але не більше ніж 300 даПа для природного газу [6].
Технічний регламент природного газу	Значення допустимого надлишкового тиску природного газу, що транспортується розподільними системами, в залежності від категорії газопроводів наведено у таблиці 1 цього документа. «... для газопроводів низького тиску, що подається до житлових будинків від 0,0017 (0,0007) МПа** до 0,0025 (0,003) МПа** ** Нормативне значення діє з 01.01.2025 року. До 01.01.2025 року діє нормативне значення, наведене в дужках » [5]



Таблиця 10

## Цистерна

Нормативний документ	Визначення
Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском	Цистерна - пересувна посудина, постійно встановлена на рамі залізничного вагона, шасі автомобіля (причепа) або інших засобах пересування, призначена для перевезення і зберігання газоподібних, рідких та інших речовин; [7].
Правила безпеки систем газопостачання	Цистерна - пересувна посудина, що встановлена на рамі залізничного вагона або на шасі автомобіля та призначена для транспортування і зберігання газоподібних та зріджених (рідких) речовин; [6].

Таблиця 11

## Якість газу

Нормативний документ	Визначення
Кодекс газорозподільних систем	Якість природного газу – параметри фізико-хімічних показників природного газу, які мають відповідати вимогам цього Кодексу [2].
Технічний регламент природного газу	Якість газу – загальна характеристика природного газу – ступінь відповідності показників природного газу встановленим вимогам, яка визначається його складом і фізичними властивостями. Показники якості газу – фізичні та фізико-хімічні показники газу, які визначають його технологічну та споживчу придатність [5].

**Висновки.** Проведений аналіз показує певну розбіжність діючих нормативних документів, деяку їхню взаємну неточність, що ускладнює використання цих документів на практиці, при експлуатації певних об'єктів, при написанні інструкцій з охорони праці, при розслідуванні нещасних випадків на виробництві,

особливо при виконанні робіт підвищеної небезпеки, у тому числі газонебезпечних. Це змушує удосконалити, привести у відповідність нормативну базу для забезпечення виконання «Закону України про охорону праці» і створенню безпечних та нешкідливих умов для працюючих та оточуючих людей.

## Література

- ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. – Чинні від 01.07.2019. – Київ. Мінрегіонбуд України, 2019. - 109 с.
- Кодекс газорозподільних систем – Офіційний вісник України від 27.11.2015 — 2015 р., № 92, с. 461. Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text>. – Заголовок з екрану. – Дата звернення 12.12.2021.
- Правила обліку природного газу. – Офіційний вісник України від 15.02.2006 – 2006 р., №5, с. 193. Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0067-06#Text>. – Заголовок з екрану. – Дата звернення 24.11.2021.
- Закон України «Про ринок природного газу». - Відомості Верховної Ради України від 03.07.2015 — 2015 р., № 27, с. 1426. Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19#Text>. - Заголовок з екрану. – Дата звернення 24.11.2021. – Дата звернення 25.11.2021.
- Технічний регламент природного газу / Кабінет Міністрів України [Електронний ресурс]. – 2019. – 61 с. – Режим доступу: <http://www.drs.gov.ua/wp-content/uploads/2019/05/4291>. - Заголовок з екрану. – Дата звернення 25.11.2021.
- НПАОП 0.00-1.76-15. Правила безпеки систем газопостачання. – Київ: Основа, 2015. – 179 с
- Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. - Офіційний вісник України від 25.05.2018 — 2018 р., № 40, с. 46. Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-18#Text>. – Заголовок з екрану. – Дата звернення 20.11.2021.
- НПАОП 0.00-5.11-85. Типовая инструкция по организации безопасного проведения газоопасных работ / ДНАОП Нормативна база [Електронний ресурс]. – 1985. – 15 с. – Режим доступу [https://dnaop.com/html/32268/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_0.00-5.11-85](https://dnaop.com/html/32268/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-5.11-85). – Заголовок з екрану. – Дата звернення 24.11.2021.
- Газы. Условия для определения объема: ГОСТ 2939-63. – [Чинний від 1964-01-01]. – М: Издательство стандартов 1988. – 2 с. – (Міждержавний стандарт).
- Справочник по газоснабжению и использованию газа / Вигдорчик Д.Я., Северинец Г.Н., Стаскевич Н.Л. – Ленинград: Издание:Недра, 1990, 762 с.

## References

1. DBN V.2.5-20:2018. Hazopostachannya. – Chynni vid 01.07.2019. – Kyiv. Minrehionbud Ukrainy, 2019. – 109 s.
2. Kodeks hazorozpodil'nykh system – Ofitsiynny visnyk Ukrainy vid 27.11.2015 — 2015 r., № 92, s. 461. Rezhym dostupu <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text>. – Data zvernennya 12.12.2021.
3. Pravyla obliku pryrodnoho hazu. – Ofitsiynny visnyk Ukrainy vid 15.02.2006 – 2006 r., №5, s. 193. Rezhym dostupu <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0067-06#Text>. – Zaholovok z ekranu. – Data zvernennya 24.11.2021.
4. Zakon Ukrainy «Pro rynek pryrodnoho hazu». - Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy vid 03.07.2015 — 2015 r., № 27, s. 1426. Rezhym dostupu <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19#Text>. –Data zvernennya 25.11.2021.
5. Tekhnichnyy rehlyment pryrodnoho hazu / Kabinet Ministriv Ukrainy [Elektronnyy resurs]. – 2019. – 61 s. – Rezhym dostupu: <http://www.drs.gov.ua/wp-content/uploads/2019/05/4291>. – Data zvernennya 25.11.2021.
6. NPAOP 0.00-1.76-15. Pravyla bezpeky system hazopostachannya. – Kyiv: Osnova, 2015. – 179 s.
7. Pravyla okhorony pratsi pid chas ekspluatatsiyi obladdannya, shcho pratsyuye pid tyskom. - Ofitsiynny visnyk Ukrainy vid 25.05.2018 — 2018 r., № 40, s. 46. Rezhym dostupu <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-18#Text>. – Zaholovok z ekranu. – Data zvernennya 20.11.2021.
8. NPAOP 0.00-5.11-85. Typovaya ynstruktsyya po orhanyzatsyy bezoparnoho provedenyya hazoopasnykh robot / DNAOP Normatyvna baza [Elektronnyy resurs]. – 1985. – 15 s. – Rezhym dostupu [https://dnaop.com/html/32268/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_0.00-5.11-85](https://dnaop.com/html/32268/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-5.11-85). – Zaholovok z ekranu. – Data zvernennya 24.11.2021.
9. Hazy. Uslovyya dlya opredelenyya ob'ema: HOST 2939-63. – [Chynnyy vid 1964-01-01]. – M: Yzdatel'stvo standartov 1988. – 2 s. – (Mizhderzhavnyy standart).
10. Spravochnyk po hazosnabzhenyyu y yspol'zovanyyu haza / Vyhdorchyk D.YA., Severynets H.N., Staskevych N.L. – Lenynhrad: Yzdanye:Nedra, 1990, 762 s.

## UDK 696.2

### Differences in determination of terms and safety requirements in regulatory documents of gas supply

Y. Franchuk<sup>1</sup>, I. Peftieva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, assistant professor. Kiev National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, [franchuk196405@gmail.com](mailto:franchuk196405@gmail.com) ORCID: 0000-0002-7910-8705

<sup>2</sup>assistant professor. Kiev National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, [piefteva.io@knuba.edu.ua](mailto:piefteva.io@knuba.edu.ua) ORCID:0000-0002-8858-9010

*Abstract. The article studies the terms and requirements of the current regulatory documents that are used in the gasification of various facilities and in their maintenance and repair. The problem is solved by comparing normative documents. The paper analyzes the current regulatory documents and analyzes the terms and concepts inherent in the gas supply industry, such as natural gas, gas quality, gas metering, gas supply system, gas hazardous work, technical lanes, pressure, tank, cylinder, etc. The differences in the interpretations of some and the same terms in the current regulatory documents, different requirements, additions to some of them by others. The article may also be useful to employees who investigate accidents, people who are preparing to pass exams in labor protection and their further work. Human life and health are a very important factor in the production process. the employer is obliged to create working conditions at each workplace, in each structural unit in accordance with regulations, as well as to ensure compliance with the requirements of the legislation on workers' rights in accordance with applicable regulations. However, analyzing the current regulations, we can see that in different existing documents the issue is treated differently. Instead of supplementing documents with each other, specifying requirements, creating a holistic and unambiguous picture in general, there is inaccuracy, ambiguity of understanding, complexity and sometimes inability to meet existing requirements. This situation does not improve the situation as a whole. The analysis shows some discrepancies between existing regulations, some of their mutual inaccuracy, which complicates the use of these documents in practice, in the operation of certain facilities, in writing instructions on labor protection, in investigating accidents at work, especially in high-risk work, including gas-hazardous. This forces to improve, bring in line the regulatory framework to ensure the implementation of the "Law of Ukraine on Labor Protection" and create safe and harmless conditions for working and others.*

*Key words: normative document, terms, definitions, natural gas, gas hazardous work, gas quality, gas supply system.*

УДК 62-664.2

## Дослідження паливно-повітряного потоку всередині вихрової топки з киплячим шаром із застосуванням спеціальної повітряно-розподільної насадки.

С.О. Алфьоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, Sergey.alf312@gmail.com, ORCID 0000-0003-3451-1004

*У статті наведено результати експериментального дослідження паливно-повітряного потоку всередині вихрової топки з киплячим шаром із застосуванням спеціальної повітряно-розподільної насадки. Застосовується насадка з нахилом пластин у 15°, що не перевищує 10% від загальної площі живого перетину камери експериментальної установки. В ході експерименту визначені граничні умови утворення вихрового потоку при різній кількості палива та різних витратах повітря, показані значення втрат тиску і швидкості потоку. Так для 2,9 кг тирси гранична швидкість утворення вихрового потоку становить 0,72 м/с, для 5,8 кг дане значення складає 0,57 м/с. Отримані результати дають змогу сформулювати рекомендації щодо удосконалення існуючих твердопаливних топок за рахунок застосування спеціальних насадок для інтенсифікації процесів горіння.*

*Ключові слова: спалювання палива, вихрові топки, аеродинаміка топки, спеціальна насадка.*

**Вступ.** Пошук альтернативних викопним джерелам теплової енергії ресурсів є постійною складовою розвитку енергетичної сфери будь-якої держави. Зараз це питання є найбільш актуальним через різноманітні політичні процеси та незмінне зменшення загальної кількості невідновлювальних природних ресурсів. Одним із способів реалізації питання заміщення природного газу, вугілля та інших видів викопного палива є спалювання відходів сільського господарства та деревообробної промисловості. Але це пов'язано зі значною кількістю технічних труднощів та недостатньою теоретичною базою для реалізації.

**Актуальність дослідження.** У наш час питання залежності від викопних енергоресурсів є найважливішою проблемою для країн Європи. Одним із перспективних рішень даної проблеми є використання вихрових твердопаливних топок для спалювання низькокалорійних видів палива, таких як відходи деревообробної та сільськогосподарської промисловості.

Наша країна має розвинені сільськогосподарський та деревообробний сектори економіки, тому кількість відходів даних виробництв є значними, що дозволяє використовувати їх для покриття енергетичних потреб держави. При цьому на території України знаходиться значна кількість твердопаливних котлів, що можуть бути використані для цього завдання.

Головними труднощами у спалюванні низькосортних палив у твердопаливних котлах є невисокий рівень корисної дії даних вихрових топок та недостатньо освітлені теоретичні відомості щодо цього.

**Останні дослідження та публікації.** Вихрова технологія є ефективною сучасною технологією енергетичного використання твердого палива та видалення пилу. До основних переваг низькосортної вихрової технології спалювання відносяться покращені екологічні показання, стійкість запалення та горіння твердого палива без підсвічування газом або мазутом, використання безмлинових схем підготовки палива. Низькотемпературна вихрова технологія спалювання палива може бути реалізована у традиційній камерній топці шляхом її модернізації. При цьому забезпечується спалювання таких твердих палив як: кам'яне та буре вугілля, горючі сланці, торф, відходи обробки деревини та інші види біопалива.

Киплячий шар у полі сили тяжіння широко застосовується у різних технологічних установках. Однак інтенсивність процесів при такому способі псевдозрідження лімітується гравітаційними силами, є проблеми з об'ємною однорідністю тепло- та масообміну в шарі. Застосування відцентрового псевдозрідженого шару у тепломасообмінних апаратах дозволяє збільшити інтенсивність процесів за рахунок більшої швидкості обтікання частинок, придушення утворення пухирів у шарі.

Для організації шару частинок у полі відцентрових сил можуть бути використані різні типи вихрових камер, наприклад, камера, що обертається [1-4], камера з нерухомою циліндричною стінкою і повітророзподільчим торцем, що обертається [5-8], різні варіанти вихрових камер з нерухомими стінками, у яких шар часток формується за рахунок закрукти пото-

ку [9].

Характеристики шару частинок у полі відцентрових сил залежать як від конфігурації вихрової камери, так і від властивостей самого зернистого матеріалу, і насамперед від щільності та розмірів частинок [10–14].

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є дослідження аеродинамічних характеристик процесу спалювання деревної тирси у вихровій топці із застосуванням спеціальної повітряно-розподільної насадки.

**Основна частина.** Експериментальна установка для визначення аеродинамічних характеристик повітряно-паливної суміші (рис. 1) складається з камери, виконаної із труби з органічного скла (1) висотою 1,2 м та діаметром 0,2 м. На висоті 0,05 м всередині труби встановлено повітряно-розподільну насадку 2 (рис. 2).

Насадка виконана із оцинкованої сталі товщиною 0,001 м. Вона складається із центрального конусу висотою 0,1 м, та тридцяти шести лопаток, напрямлених під кутом  $15^\circ$  до горизонтальної площини. Така конструкція повітряно розподільної насадки має площу живого перетину  $0,016 \text{ м}^2$ , що не перевищує 10% від загальної площі живого перетину камери експериментальної установки.

Для підведення повітря до камери встановлюється патрубок 3 у нижній частині камери. Для недопущення виносу досліджуваного матеріалу з камери дослідної установки зверху встановлюється захисна сітка 4. Для визначення перепаду тиску всередині камери передбачаються патрубки 5.

Для подачі повітря до установки застосовується вентилятор ВВД 5 з електродвигуном потужністю 3 кВт.

В якості досліджуваного матеріалу використовується тирса з розміром частинок не більшу  $0,003 \text{ м}^2$ , вологістю 12% та насипною густиною  $185 \text{ кг/м}^3$ .

У ході експерименту визначається швидкість повітряно-паливної суміші та перепад тиску за умови різної кількості повітря, що подається всередину установки.

Для визначення аеродинамічних характеристик суміші повітря і тирси в експериментальній установці із повітророзподільною насадкою в установку на повітророзподільну решітку засипається тирса. При цьому поступово збільшується витрата повітря.

Результати та їх відображення. Для експериментів №1 - №5 в установку засипано 2,9 кг тирси, для експериментів №6 - №10 використано 5,8 кг тирси.

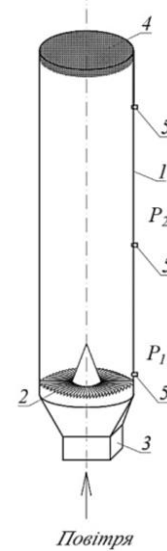


Рис. 1 Принципова схема експериментальної установки

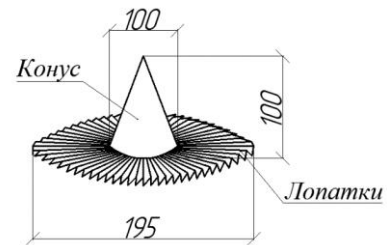


Рис. 2 Принципова схема повітророзподільної насадки

Отримані в ході експерименту результати зведено до таблиці 1 та надані на рис. 3.

На рис. 3 наведено графік залежності витрат тиску від швидкості повітряно-паливної суміші. Номер вимірювання (1-10) відповідають порядковому номеру експерименту згідно таблиці 3.

Таблиця 1.

Результати вимірювань			
№	Витрата повітря $G, \text{ м}^3/\text{с}$	Середня швидкість повітряно-паливної суміші $V, \text{ м/с}$	Перепад тиску $\Delta P = P_1 - P_2, \text{ Па}$
Вага шару тирси 2,9 кг			
1	0,008	0,67	10
2	0,016	0,69	18
3	0,021	0,71	25
4	0,033	0,72	33
5	0,042	0,73	40
Вага шару тирси 5,8 кг			
6	0,008	0,51	50
7	0,016	0,53	64
8	0,021	0,55	78
9	0,033	0,57	94
10	0,042	0,59	110

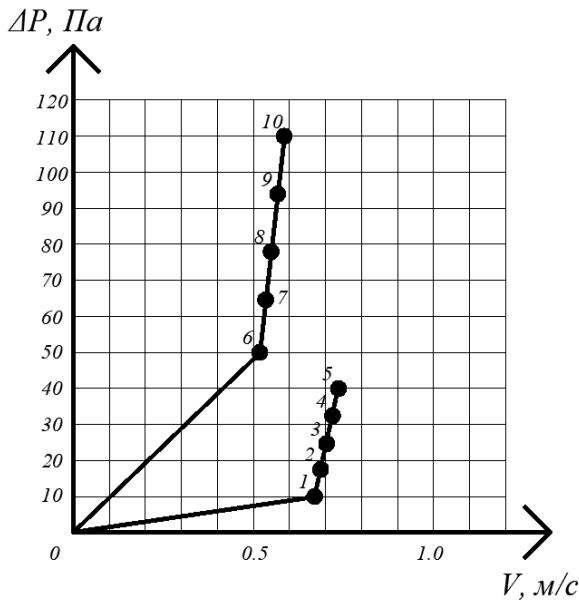


Рис. 3. Графік залежності втрати тиску повітряної суміші від швидкості руху.

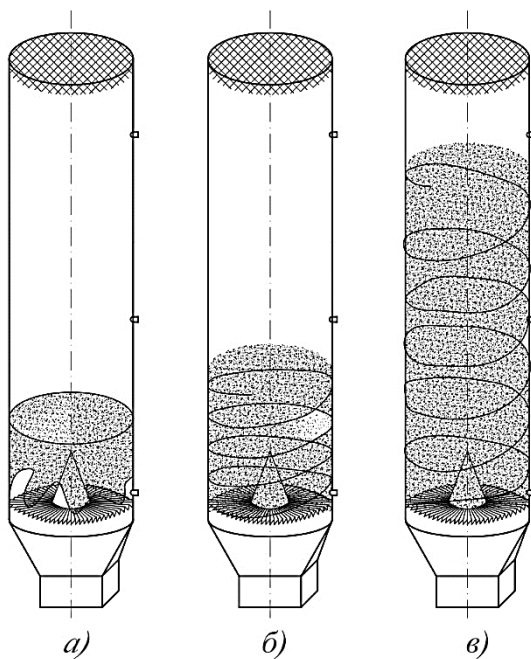


Рис. 4 Характер розповсюдження паливно-повітряної суміші за різної витрати повітря при масі тирси 2,9 кг: а – експеримент №1; б – експеримент №3; в – експеримент №5.

При витраті повітря до 0,01 м<sup>3</sup>/с та швидкості до 0,7 м/с спостерігається незначне неоднорідне підняття шару тирси над повітродіподільною насадкою (Рис. 4а). Утворення вихрового потоку не відбувається.

За витрати повітря 0,02 – 0,03 м<sup>3</sup>/с та швидкості 0,7 – 0,72 м/с спостерігається підняття шару тирси над насадкою із незначним завихренням потоку у напрямку напрямлення повітродіподільних пластин насадки (Рис. 4б).

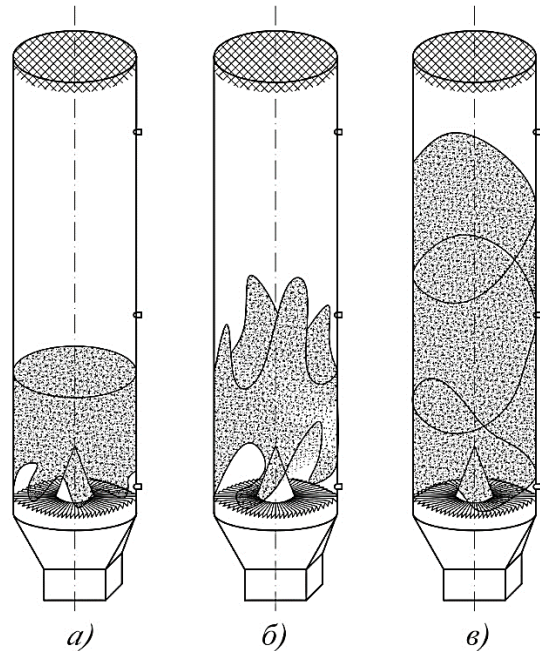


Рис. 5 Характер розповсюдження паливно-повітряної суміші за різної витрати повітря при масі тирси 5,8 кг: а – експеримент №6; б – експеримент №8; в – експеримент №10.

За витрати повітря 0,03 – 0,045 м<sup>3</sup>/с та швидкості більше 0,72 м/с спостерігається вихровий потік суміші повітря і тирси по всій висоті камери експериментальної установки.

За більшої у два рази, порівняно із експериментами №1-№5, маси тирси спостерігається збільшення значень перепадів тиску всередині камери експериментальної установки майже в 2 рази. При цьому швидкість руху суміші повітря і палива навіть за витрати повітря 0,045 м<sup>3</sup>/с (Рис. 5в) не перевищує 0,6 м/с.

Шар тирси вагою близько 5,8 кг (рис.5) за швидкості повітря до 0,55 м/с підіймається окремими зонами, утворюючи «киплячу» зону знизу. При цьому верхня частина шару є нерухомою.

За швидкості повітря в діапазоні значень від 0,55 м/с до 0,57 м/с шар починає підійматися хаотично, утворюючи киплячу зону висотою близько 400 мм.

За швидкості повітря більше 0,57 м/с шар тирси вагою близько 5,8 кг стабілізується і починає рухатися за вихровим напрямком, але на відміну від меншої вдвічі кількості тирси, рух більшого шару є менш інтенсивним.

**Висновки:** У ході проведених експериментів визначені оптимальні параметри паливно-повітряної суміші для тирси. При цьому для інтенсифікації повітряного потоку застосовувалася повітряно-розподільна насадка. Визначені критичні значення швидкостей, при яких

починає формуватися вихровий киплячий шар.

#### **Перспективи подальших досліджень.**

В подальшому планується розглянути інші види твердого палива та вплив різних кутів нахилу лопаток на повітряно-розподільній насадці на аеродинамічні характеристики все-

редині вихрової топки. Все це дозволить сформулювати рекомендації щодо вдосконалення існуючих твердопаливних вихрових топок.

#### **Література.**

1. Карп И. Н. и др. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 5. С. 13-20.
2. Бородуля А. В., Пальченко Г. И. Перспективы применения и методы расчета сжигания натурального и денсифицированного биотоплива в кипящем слое. *Вести НАН Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2003. № 3. С. 116-123.
3. Рябов Г. А. *Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое*. Дис. ... докт. техн. наук, Москва: ОАО «ВТИ». 2016.
4. Вирясов Д. М. *Псевдоожидение и сжигание биотоплива в многокомпонентных слоях*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва: ФГБОУ «Тамбовский государственный технический университет», 2013.
5. Redko, Y. Burda, R. Dzhyoiev, I. Redko, V. Norchak, S. Pavlovskiiy, O. Redko Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows. *Thermal Science*, 2020, vol. 19, online first, pp. 158-177.
6. Рябов Г. А. и др. Опыт сжигания различных видов биомассы в России и Белоруссии // *Электрические станции*, №9(1010), 2015, с. 9-7.
7. Rundygin, Yu. A., et al., Modernization of boilers based on low-temperature vortex technology for burning solid fuels, *Energy: economics, technology, ecology*, 4 (2000), pp. 19-22.
8. Shestakov, S. M., Aronov A. L., *Technology of Combustion of Local Solid Fuel Types*, ESCO, 2014.
9. Кроу Д. Численные модели течений газа с наибольшим содержанием частиц. Теоретические основы инженерных расчетов. т. 104, №3, 1982, с. 114-122.
10. Launder B. E., Spalding. D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London : Academic Press, 1972. 169 p.
11. Jones. *Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review*. Combust. Flame. Whitelaw, 1982.
12. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М: Наука, 1978.
13. Badzioch S., Hawksley P. G. W. *Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles*. Ind. Eng. Chem. Process Design and Development, 1970.
14. Hong, G., Paul, G., Arias, A., et al. Direct numerical simulations of statistically stationary turbulent premixed flames. *Combustion Science and Technology*. 188(2016), 8, pp.1182-1198.

#### **References**

1. Karp IN et al. Mathematical modeling of the combustion process of wood particles. *Energy technology and resource conservation*. 2010. No. 5. S. 13-20.
2. Borodulya A. V., Palchenok GI Prospects for the application and methods of calculating the combustion of natural and den-sified biofuel in a fluidized bed. *News from the National Academy of Sciences of Belarus. A series of physical and technical sciences*. 2003. No. 3. S. 116-123.
3. Ryabov GA Scientific substantiation of the use of technology for burning solid fuels in a circulating fluidized bed. Dis. ... doct. tech. Sciences, Moscow: JSC "VTI". 2016.
4. Viryasov DM Pseudo-liquefaction and combustion of biofuel in multicomponent layers. Dis. ... Cand. tech. Sci., Moscow: FGBOU "Tambov State Technical University", 2013.
5. Redko, Y. Burda, R. Dzhyoiev, I. Redko, V. Norchak, S. Pavlovskiiy, O. Redko Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows. *Thermal Science*, 2020, vol. 19, online first, pp. 158-177.
6. Ryabov GA et al. Experience of burning various types of biomass in Russia and Belarus // *Electric stations*, No. 9 (1010), 2015, p. 9-7.
7. Rundygin, Yu. A., et al., Modernization of boilers based on low-temperature vortex technology for burning solid fuels, *Energy: economics, technology, ecology*, 4 (2000), pp. 19-22.
8. Shestakov, S. M., Aronov A. L., *Technology of Combustion of Local Solid Fuel Types*, ESCO, 2014.
9. Crow D. Numerical models of gas flows with a high content of particles. *Theoretical foundations of engineering calculations*. t. 104, no. 3, 1982, p. 114-122.
10. Launder B. E., Spalding. D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London : Academic Press,

1972. 169 p.

11. Jones. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review. Combust. Flame. Whitelaw, 1982.

12. Loytsyansky L.G. Mechanics of liquid and gas. M: Science, 1978.

13. Badzioch S., Hawksley P. G. W. Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles. Ind. Eng. Chem. Process Design and Development, 1970.

14. Hong, G., Paul, G., Arias, A., et al. Direct numerical simulations of statistically stationary turbulent premixed flames. Combustion Science and Technology. 188(2016), 8, pp.1182-1198.

---

**UDK 62-664.2**

## **Investigation of the fuel-air flow inside a vortex furnace with a fluidized bed using a special air-distributing nozzle.**

S. Alforov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Post-graduate student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, sergey.alf312@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3451-1004

***Annotation.** The search for resources alternative to fossil sources of thermal energy is a constant component of the development of the energy sector of any country. This issue is now most urgent due to various political processes and the constant decrease of the total amount of non-renewable natural resources. One of the ways to implement the issue of replacing natural gas, coal and other types of fossil fuels is the burning of waste from agriculture and the woodworking industry. But this is associated with a significant number of technical difficulties and an insufficient theoretical basis for implementation. The article presents the results of an experimental study of the fuel-air flow inside a fluidized-bed vortex furnace using a special air-distributing nozzle. A nozzle with a 15° slope of the plates is used, which does not exceed 10% of the total area of the free section of the chamber of the experimental setup. In the course of the experiment, the limiting conditions for the formation of a vortex flow at different amounts of fuel and different air flow rates are indicated, and the values of pressure losses and flow rates are shown. So for 2.9 kg of sawdust, the maximum speed of formation of a vortex flow is 0.72 m/s, for 5.8 kg this value is 0.57 m/s. The results obtained make it possible to formulate recommendations for the improvement of existing solid fuel furnaces through the use of special nozzles to intensify combustion processes. In the future, it is planned to consider other types of solid fuel and the influence of different angles of inclination of the blades on the air distribution nozzle on the aerodynamic characteristics inside the vortex furnace. All this will make it possible to formulate recommendations for the improvement of existing solid fuel vortex furnaces.*

**Key words:** fuel combustion, vortex furnaces, furnace aerodynamics, special nozzle.

УДК 69-628.8

## Підвищення ефективності використання водяних систем променевого опалення.

О.О. Синіло<sup>1</sup>

<sup>1</sup> асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, tracasana@gmail.com, ORCID 0000-0002-1281-3477

*На даний момент все більшого значення набуває питання захисту навколишнього середовища і скорочення кількості використання викопних невідновлювальних джерел енергії. Для сучасних систем опалення та кондиціонування обов'язкове скорочення викидів шкідливих речовин, особливо CO<sub>2</sub>. Це можливо реалізувати шляхом значного скорочення використання викопних невідновлювальних видів палива та реконструкції інженерних систем до сучасного рівня енергозбереження. Щорічне зростання попиту на викопне паливо буде скорочуватися за допомогою оптимізації теплових пунктів та приладів розподілення тепла, що є необхідним кроком для розвитку промисловості та економіки країни. Тому сьогодні головним завданням є підвищення енергетичної ефективності використання ресурсів і збільшення потенціалу альтернативних видів енергії в комбінації з сучасними низькотемпературними енергоефективними системами розподілу тепла одними з яких є променеві водяні панелі. У статті наведено результати вдосконалення методики монтажу променевих стельових приладів відносно їх орієнтації в просторі. Результати чисельних розрахунків вказують на ефективність монтажу обладнання під кутом 45 градусів, що збільшує ефективність на 10% відносно орієнтації 0°.*

*Ключові слова: променеве опалення, енергозбереження, низькотемпературна система опалення, енергоефективність.*

**Вступ.** Актуалізація питань покращення ефективності роботи систем розподілу тепла є ключовою в наш час. Використання низькотемпературних водяних променевих систем опалення є одним з енергоефективних та сучасних варіантів.

Якщо розглядати сучасні конвекційні системи розподілу опалення в приміщеннях, можна помітити питання перегріву верхніх зон які не використовуються людиною. [1]. Цей фактор призводить до витрати енергетичних ресурсів, підвищення потужності джерела тепла та зменшення його корисної дії, особливо якщо говорити про низькотемпературні джерела теплоносія де коефіцієнт перетворення теплоти (COP – Coefficient of Performance) в його основі лежить залежність потужності від зовнішньої температури повітря. [11]

Переваги використання кліматичних променевих панелей : відсутність перегріву верхніх зон приміщень, шуму роботи, необхідності в технічному обслуговуванні (підшипники, мастило), конвекційного переносу пилу та зниження пікового навантаження на джерело тепла, що в свою чергу зменшує витрати при визначенні потужності системи та підборі обладнання [6,7,8].

**Актуальність дослідження.** Одним з основних напрямів енергозбереження є розробка нових технологій ефективного використання енергетичних ресурсів, для досягнення необхідних параметрів мікроклімату приміщень,

шляхом впровадження прогресивних науково обґрунтованих методів.

**Останні дослідження та публікації.** Раціональне та обґрунтоване застосування технологій променевого опалення дає змогу зменшити кількість використання ресурсів та використовувати тепловий потік направлено (робоча зона, вхідна група, тощо), де є необхідність, при цьому зменшити використання корисної площі будівлі так як основне обладнання розміщується під стелею.

Якість системи опалення значною мірою залежить від того як тепло для неї може бути отримано та передано до споживача. Тобто необхідна можливість направити тепловий потік, таким чином щоб його можна було використовувати там де воно найбільш потрібне в конкретний час. Основний потенціал енергозбереження при поверхневому опаленні є правильний вибір системи теплопередачі.

Згідно з даними досліджень проведеними німецькою компанією під керівництвом професора Хайнц Бака [14] у 2017 році було проведено аналіз ключових розрахункових факторів променевого опалення та виділено такі як:

- сприйняття людиною температури;
- розподіл теплового потоку по висоті;
- час реакції системи на зміни температурних коливань ззовні та загальна керованість системою;
- температурний графік джерела теплопостачання.



Важливим фактором необхідно виділити те, що променеве опалення ефективно працює при температурі теплоносія від 30 °С, що в свою чергу є важливим техніко-економічним показником і дає змогу використовувати їх в комбінації з тепловими насосами [3]. За допомогою такого комплексного підходу стає можливо реалізувати енергоефективне інженерне рішення.

Потенціал збереження теплової енергії, що включає в себе низку факторів наведено на рис.1.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є чисельне дослідження впливу кута нахилу променевої стельової панелі на його ефективність відносно приміщення в яке спрямовується тепловий потік.

Результати та їх відображення. Припущено, що зміна кута нахилу відносно горизонтальної площини призводить до перерозподілу конвекційної складової роботи променевого опалення, що складає 30% від загальної теплової потужності [4]. Нижче наведені схеми на рисунку 2. можливого використання панелей, особливу увагу потрібно приділити приміщенням аркового типу, наприклад спортивній арені, ангари і тому подібне.

Для виконання дослідження яке б висвітлювало поведінку ефективності променевих панелей українського виробництва відносно кута їх нахилу було взято три модулі довжиною 6 метрів, ширина одного 0.396 м. висота 0,04 м. всередині вбудовані 4 циркуляційні трубки з оцинкованої сталі внутрішній діаметр яких - 12 мм, над трубами розміщено ізоляційний шар мінеральної вати товщиною 40 мм. зверху якого знаходиться шар алюмінієвої відбиваючої пластини [12]. Група чотирьох циркуляційних труб по подавальному та зворотному трубопроводі об'єднуються в колектори на яких одна зовнішня різьба діаметром 25 мм для під'єднання до джерела теплопостачання.

Кліматичні панелі монтуються до стелі за допомогою підвісів у складі яких були талрепи за допомогою яких можливо було змінювати кут нахилу обладнання.

Потужність одного модуля з двома колекторами при розрахунковому температурному графіку системи 65/60 °С складала 1658 Вт. згідно паспорту обладнання. В якості джерела теплопостачання використовувався тепловий насос «Повітря-вода» модель 12 кВт [13].

Тепловтрати приміщення склалися з таких огорожувальних конструкцій: вікно одно-

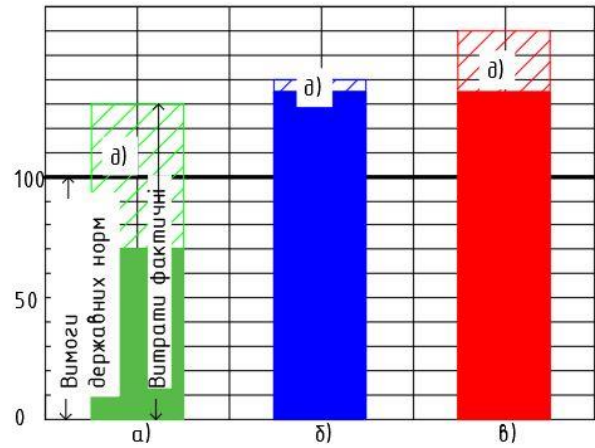


Рис. 1 Схема потенціалу збереження теплової енергії при використанні променевого опалення (а – користь використання ; б –розподіл теплової енергії; в – генерація теплоносія; д – потенціал збереження)

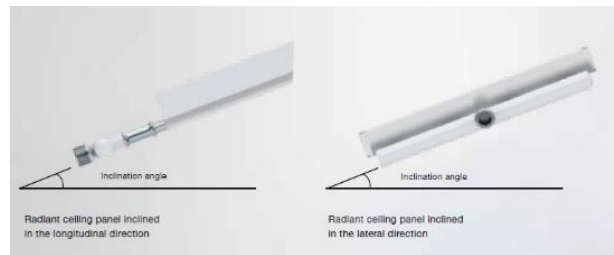


Рис. 2 Схема варіанту монтажу..

камерне 2.8 м<sup>2</sup>, зовнішні стіни у кількості 3 шт. загальною площею 124 м<sup>2</sup> і становили 4212 Вт. при зовнішній температурі повітря -12 °С [2].

Були встановлені однакові температурні вимоги до приміщення, а саме початкова температура нагріву 8°С, час заміру 1 година. Основною задачею було проаналізувати витрату теплоносія за однаковий проміжок часу при різних похилих площах: 0, 15, 30 та 45° та зафіксувати кінцеву температуру приміщення.

Стельові променеві панелі опалення розташовуються на відстані півтора метри до стелі, та 7 метрів від рівня чистої підлоги, датчик температури повітря встановлено на висоті 1,6 м.

В якості приладів для аналізу результатів досліді використовувалися: годинник, цифровий термостат з дисплеєм і датчиком температури сприйняття ( середня між температурою повітря та випромінення ) дані з якого були зняті і передані на контролер, витратомір механічний [14].

Результати чисельних розрахунків наведено в таблиці 1.

Результати проведених досліджень показують ефективність зміни кута нахилу відносно горизонтального розміщення при якому променева панель опалення розташовується

під кутом 0°, відносно підлоги, різниця в остаточних результатах дослідів становить 10%.

Кінцеві показники показали, що залежність орієнтації клімат-панелі лінійно пов'язана з ефективністю її використання.

Отриманий результат можна охарактеризувати як ефект від перенесення теплового потоку конвекційної складової опалювального обладнання до його більш віддалених частин вгору відносно нижньої відмітки підвісу та подальшому поглинанню корпусом панелі. При цьому енергія не втрачається на нагрів верхніх шарів приміщення [5].

Використання такого варіанту монтажу можливо коли випромінювачі нахилені в бічному або повздовжньому напрямку.

Нахил панелі збільшує потужність відповідно отриманим коефіцієнтам згідно результатів таблиці 1. Збільшення кута нахилу необхідно враховувати і при обчисленні масової витрати, що впливає на опір системи.

Максимально допустимий кут нахилу залежить від технології підвісу та геометричних параметрів приміщення [9].

Ефект переносу конвекційного теплового потоку показано на рис. 3, що висвітлює процес який відбувається при активній опалювальній фазі. Таким чином було зменшено втрати від конвекційної складової на 10%.

**Висновки.** Результати розрахунків та замірів показують, що використання променевого опалення в бічному або повздовжньому напрямку під різними кутами дозволяють значно зменшити затрати енергетичних ресурсів на опалення при низькотемпературному режимі та при цьому не втратити швидкодію на зміну зовнішніх температурних параметрів. Найбільш ефективним з проведених варіантів дослідів виявився варіант підвісу під кутом 45° при якому було виявлено збільшення ефективності на 10% по кінцевим температурам, що в свою чергу дає змогу зменшити використання теплової енергії та зменшити кількість необхідного обладнання при проектних розрахунках. При цьому складнощів монтажу виявлено не було.

**Перспективи подальших досліджень.** В подальшому планується розглянути інші можливості ефективного монтажу панельного опалення для підвищення ефективності роботи та використати різні варіанти їх складових.

Таблиця 1

Параметр, одиниця виміру	Результати розрахунків.			
	Кут нахилу обладнання, °			
	0	15	30	45
Потужність обладнання, Вт.	3627	3627	3627	3627
t1, °C	65	65	65	65
t2, °C	60	60	60	60
G, кг/год	156	156	156	156
Температура внутрішня початкова, °C	8,2	8,8	8,3	8,9
Початкова температура поверхонь в приміщенні, °C	8,4	8,6	8,2	8,1
Час заміру, хв.	60	60	60	60
Кінцева температура поверхонь в приміщенні, °C	8,4	8,6	8,2	8,1
Кінцева температура по термостату °C	12,3	12,7	13,1	13,8
Кінцева температура повітря приміщення, °C	11,2	11,5	11,9	12,3
Ефективність відносно кута нахилу 0°C	-	3	6,5	10

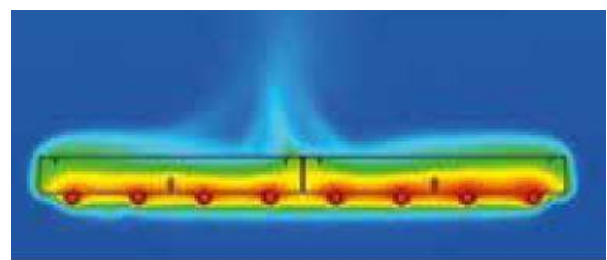


Рис. 3 Процес опалення променевим опаленням на динамічному тепловізорі.

### Література.

1. Ф.А. Миссенар. Лучистое отопление и охлаждение – 1961. – С. 266-293
2. Захаревич А.Э. Особенности формирования микроклимата отапливаемых помещений – 2018 – С.3-11
3. П.И.Дячек, А.Э. Захаревич Численное исследование распределения параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции– 2008 – С.10
4. В.Н. Богословский, Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха), -1982- С.415-418
5. Bjarne, P Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass – (1989)
6. Holst, S. and Simmonds, P., (1999), Kühlkonzeption am Beispiel Flughafen Bangkok
7. ISO 7730 (1994), Moderate thermal environments – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort
8. Simmonds, P., Gaw, w., Holst, S., Reuss, S. (2000), Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions, ASHRAE Trans. 2000, Part 1 (in print).
9. DIN 1946 (1994)“Raumluftechnik Teil 2”, 1994.Berlin: Deutsches Institut für Normung
10. Ogoli, D.M., “Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass,” Energy and Buildings 35 (9). 851-862. Oct.2003..
11. Heat Pumps [Electronic Resource] / IEA. – Access Mode: <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>. – Access Date: 11.03.2021
12. EFFI [Electronic Resource] Водяні кліматичні панелі; <https://effi.com.ua/> - Access Date: 08.02.2019 v.2
13. Nibe [Electronic Resource] Теплові насоси технічна документація ; Теплові насоси
14. Zehnder Group Germany GmbH (Zehnder Group Deutschland GmbH), Energy-efficient with a high heat recovery

### References

1. F.A. Missenar. Radiant heating and cooling - 1961. - - pp. 266-293
2. Zakharevich A.E. Features of the formation of the microclimate of heated rooms - 2018 - P.3-11
3. P.I. Dyachek, A.E. Zakharevich Numerical study of the distribution of microclimate parameters in heated rooms under natural convection conditions - 2008 - P.10
4. V.N. Bogoslovsky, Building thermophysics (thermophysical foundations of heating, ventilation and air conditioning), -1982- P.415-418
5. Bjarne, P Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass - (1989)
6. Holst, S. and Simmonds, P., (1999), Kühlkonzeption am Beispiel Flughafen Bangkok
7. ISO 7730 (1994), Moderate thermal environments – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort
8. Simmonds, P., Gaw, w., Holst, S., Reuss, S. (2000), Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions, ASHRAE Trans. 2000, Part 1 (in print).
9. DIN 1946 (1994) “Raumluftechnik Teil 2”, 1994. Berlin: Deutsches Institut für Normung
10. Ogoli, D.M., “Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass,” Energy and Buildings 35 (9). 851-862. Oct.2003..
11. Heat Pumps [Electronic Resource] / IEA. – Access Mode: <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>. – Access Date: 03/11/2021
12. EFFI [Electronic Resource] Water climate panels; <https://effi.com.ua/> - Access Date: 08.02.2019 v.2
13. Nibe [Electronic Resource] Heat pumps and technical documentation; [Теплові насоси](#)
14. Zehnder Group Germany GmbH (Zehnder Group Deutschland GmbH), [Energy-efficient with a high heat recovery](#)

**UDK 69-628.8**

## Improving the efficiency of using water radiant heating systems.

O. Synilo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Post-graduate student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, trapacana@gmail.com, ORCID 0000-0002-1281-3477

*Abstract.* Now, the issue of protecting the environment and reducing the use of fossil non-renewable energy sources is

*becoming increasingly important. For modern heating and air conditioning systems, it is imperative to reduce emissions of harmful substances, especially CO<sub>2</sub>. This can be realized by significantly reducing the use of fossil non-renewable fuels and reconstructing engineering systems to the current level of energy saving. The annual growth in demand for fossil fuels will be reduced through the optimization of substations and heat distribution devices, which is a necessary step for the development of the country's industry and economy. Therefore, today the main task is to increase the energy efficiency of the use of resources and increase the potential of alternative types of energy in combination with modern low-temperature energy-efficient heat distribution systems, one of which is radiant water panels. The article presents the results of improving the method of mounting beam-ceiling fixtures with respect to their orientation in space. The results of numerical calculations indicate the efficiency of mounting the equipment at an angle of 45 degrees, which increases the efficiency by 10% in relation to the 0° orientation. The results of calculations and measurements show that the use of radiant heating in a lateral or longitudinal direction at different angles allows to significantly reduce the cost of energy resources for heating at low temperatures and at the same time not to lose the speed of operation to changes in external temperature parameters. The most effective of the variants of the experiment turned out to be the variant of suspension at an angle of 45°, in which an increase in efficiency by 10% in terms of final temperatures was found, which in turn makes it possible to reduce the use of thermal energy and reduce the amount of necessary equipment in design calculations. At the same time, installation difficulties were not detected.*

**Key words:** *radiant heating, energy saving, low-temperature heating system, energy efficiency.*

УДК 696.2

## Вплив теплоти згоряння на розрахунки при транспортуванні та споживанні природного газу

В. А. Коновалюк<sup>1</sup>, Ю. Й. Франчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [konovaliuk.va@knuba.edu.ua](mailto:konovaliuk.va@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0001-5115-7188

<sup>2</sup> к.т.н., ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [franchuk.yy@knuba.edu.ua](mailto:franchuk.yy@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0002-7910-8705

*Україна як незалежна держава має ринкову економіку, яка працює за вимогами світового ринку природного газу. Газ став товаром, тобто має свою ціну в залежності від його якості та попиту на нього. Сучасні нормативи якості газу передбачають контроль близько тридцяти показників. Коефіцієнт корисної дії газових приладів збільшився приблизно на 25 %. Законодавчо закріплена вимога проведення обліку газу як в одиницях об'єму так і в енергетичних одиницях, аналогічно до обліку в країнах ЄС. При проведенні обліку газу використовується вища теплота згоряння, тобто вся енергія газу. Але при проведенні гідравлічних розрахунків при проектуванні і реконструкції газових мереж досі використовують значення нижчої теплоти згоряння. При підборі газовикористовуючого обладнання на підставі даних заводів-виробників, також вказуються характеристики роботи приладів, орієнтовані на нижчу теплоту згоряння. Виникають розбіжності підходу до визначення енергетичної складової, що міститься в певному обсязі газу, на різних ділянках газотранспортної системи. Як наслідок, кількість енергії змінюється. Пропонується використовувати вищу теплоту згоряння не лише при обліку газу, а і при проведенні розрахунків на всіх етапах руху газу по газотранспортній мережі, а також при проведенні гідравлічних розрахунків газопроводів.*

*Ключові слова: газопостачання, вища теплота згоряння, нижча теплота згоряння, облік газу, якість газу*

**Вступ.** Україна успадкувала від Радянського Союзу систему газопостачання, в якій облік природного газу в одиницях об'єму здійснювався тільки на великих підприємствах. Для інших споживачів нарахування за спожитий газ проводили по укрупнених показниках, а саме по опалювальній площі приміщення, кількості жильців тощо. Встановлення лічильників газу почалось з середини 90-х років минулого століття.

Підписання Угоди про асоціацію з ЄС та прийняття України кандидатом в члени ЄС наклало на нашу державу зобов'язання з втілення певної низки нормативно-правових актів ЄС в сферу газового ринку. Це передбачає забезпечення прав споживачів на отримання інформації про спожиту ними енергію, створення умов для спрощеної транскордонної торгівлі газом, гарантії експлуатаційної сумісності систем вимірювання, розвитку спільного ринку газу тощо [1].

При транзиті газу і його транспортуванні виникають певні ускладнення: вплив війни, рішення ряду країн про поступову відмову від російського газу, перехід на альтернативні джерела енергії, в тому числі біогаз.

**Актуальність дослідження.** Для забезпечення сталої роботи вітчизняного ринку газу необхідно прийняти та запровадити принципи та процедури вимірювання кількості газу, який

продається чи передається, як енергетичного товару. Крім того потрібно проаналізувати принцип проведення розрахунків для газотранспортних і розподільних мереж враховуючи точний облік газу. Споживач має отримувати чітко визначену кількість енергії за яку буде розрахуватись, а надавач послуги -отримувати кошти за конкретно надані послуги [2].

Запровадження на ринку природного газу України розрахунку за спожитий чи переданий газ в енергетичних одиницях дасть змогу більш точно визначити навантаження на газові мережі, підбирати діаметр труб та обладнання і проводити розрахунки за реально надані послуги.

З огляду наведеної інформації можна стверджувати що проблема вимірювання природного газу в енергетичних одиницях стосується всіх споживачів, продавців, посередників на ринку газу в Україні та за її межами.

Останні дослідження та публікації. Енергетична стратегія України [1], передбачає забезпечення повноти та прозорості обліку всіх форм енергії. Згідно положень цього документа газ займає в енергетичному балансі України 1/3 частину. Правову основу на ринку природного газу складають Конституція України, закони України «Про ринок природного газу», «Про комерційний облік газу», «Про трубопровідний транспорт», «Про енергозбереження». «Про охорону навколишнього середовища» тощо. На

Таблиця 1

## Видобуток і використання природного газу в Україні

Показник, млрд.м <sup>3</sup>	Роки					
	1990	2000	2010	2014	2017	2021
Власний видобуток	25,4	18,1	19,1	20,5	20,5	19,8
Споживання	118,8	73,4	57,6	42,6	31,9	28,0
Імпорт	90,7	59,3	36,6	24,2	14,1	13,3

рівні газорозподільних мереж облік газу регламентується Кодексом газорозподільних мереж, Технічним регламентом природного газу [3-5].

Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії» передбачає надання у платіжних документах інформації про спожитий обсяг енергії у кіловат-годинах кВт\*год). В п.9 Прикінцевих та перехідних положень цього Закону зазначено що «до 1 травня 2022 року привести тарифи на послуги із транспортування, зберігання, розподілу природного газу, що визначені в одиницях об'єму, у відповідність з тарифами, визначеними в одиницях енергії, застосовуючи коефіцієнт, який відповідає значенню вищої теплоти згоряння, що дорівнює 10,64 кВт\*год/куб.м» [6].

Проводились дослідження впливу показників якості природного газу на процес горіння, оцінка його якості, як енергоносія, на основі лінгвістичної інформації та розроблені рекомендації по удосконаленню системи обліку природного газу в одиницях енергії [7, 8, 9].

Формулювання цілей статті. Метою роботи є аналіз впливу теплоти згоряння на розрахунки при транспортуванні і споживанні природного газу.

**Основна частина.** Газова промисловість України почала свій розвиток ще на початку 20 сторіччя на Прикарпатті. Проте основні газові мережі побудовано в 70-80-х роках минулого століття. Максимальний видобуток газу в Україні відбувся в 1975 році і становив 68,7 млрд. м<sup>3</sup>, а максимальне його споживання в 1990 році склало 118,8 млрд.м<sup>3</sup>. Надалі обсяги споживання та видобутку зменшувалися. На початку 90-х років видобуток газу стабілізувався. Видобуток природного газу в Україні за останні вісім років коливається в межах 20 млрд.м<sup>3</sup>, а споживання – 30 млрд.м<sup>3</sup> (табл.1).

Розвідані запаси природного газу в Україні становлять за різними оцінками від 1080 до 1800 млрд. м<sup>3</sup>. Джерелом енергії є і потенціал біогазу обсягом до 10 млрд. м<sup>3</sup>.

В структурі газоспоживання також відбулись суттєві зміни. В колишньому СРСР частка населення в загальному обсягу споживання природного паливного газу не перевищувала 10%. Сьогодні обсяг газу, що споживає населення разом із бюджетними та теплогенеруючими організаціями, складає більше 50 %.

Основним нормативним документом що

визначав якість газу був ГОСТ 5542-87 «Газы горючі природні для промислового та комунально-побутового призначення. Технічні умови» (раніше ГОСТ 5542-78), який діяв з 01.01.1988 р. до 01.01.2022 р. [10].

Цей норматив регламентував вимоги до 8 параметрів фізико-хімічних показників, в тому числі тільки нижчу теплоту згоряння. Цей показник визначався при температурі газу 20 °С, тиску 101,325 кПа і повинен відповідати рівню не менше 31,8 МДж/м<sup>3</sup> (7600 ккал/м<sup>3</sup>).

Такі ж значення вимог до нижчої теплоти згоряння вказані у державних будівельних нормах, чинних в період з 1962 року по теперішній час (СНиП І-Г.9-62 «Газоснабжение. Наружные сети и сооружения», СНиП 2.04.08-87 «Газоснабжение», ДБН В.2.5-20-2001 «Газопостачання» і ДБН В.2.5-20:2018 «Газопостачання» [1].

У період до 1995 року були відсутні газові лічильники у споживачів комунально-побутового сектора (населення, більшість дрібних та середніх споживачів газу), а отже визначити спожитий об'єм газу було неможливо. Коефіцієнт корисної дії газових приладів, які працювали у вказаний період, був невисокий (близько 65-70 %) [11].

Відсутність потреби в точному обліку газу відбувалось внаслідок його низької ціни і відсутності ринкових відносин в економіці країни. В силу цих причин на якість газу, його енергетичну цінність не звертали особливої уваги. Наразі Україна відновила свою незалежність і в 2005 році ЄС оголосив про ринковий статус економіки України. Газ став товаром, і у відповідності до своєї якості та попиту має змінну ціну. Цей процес активізувався із підписанням Угоди про асоціацію України з ЄС та ухвалою рішення про надання Україні статусу кандидата на членство в ЄС.

Підвищення вартості природного газу спонукало споживачів до заміни застарілих побутових газових приладів на сучасні, що мають більший коефіцієнт корисної дії. Встановлюються прилади, які мають ККД не менше 90% при нижчій теплоті згоряння. Також популярність набувають конденсаційні котли, що працюють використовуючи вищу теплоту згоряння.

Таблиця 2

Аналіз відповідності складу газу в маршрутах оператора ГТС вимогам Кодексу ГТС

Показник	Метан CH <sub>4</sub> , мол. %	Етан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , мол. %	Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , мол. %	Азот N <sub>2</sub> , мол. %	Вуглекислий газ CO <sub>2</sub> , мол. %	Інші сполуки
Кодекс ГТС	мінім. 90	макс. 7	макс. 3	макс. 5	макс. 2	-
Марш. 108	85,99	8,98	0,10	2,42	2,34	0,17
Марш. 171	95,89	2,34	0,69	0,64	0,20	0,24

Таблиця 3

Аналіз фізико-хімічних властивостей газу в маршрутах оператора ГТС вимогам Кодексу ГТС і Технічного регламенту природного газу

Показник	Теплота згоряння нижча Q <sub>н</sub> , МДж/м <sup>3</sup>	Теплота згоряння вища Q <sub>в</sub> , МДж/м <sup>3</sup>	Число Воббе вище, МДж/м <sup>3</sup>	Температура точки роси вологи (P = 3.92 МПа), °C	Температура точки роси вуглеводнів, °C
Кодекс ГТС	мінім. 32,66 макс. 34,54	(25/20) °C мінім.36,20 макс.38,30 (25/0) °C мінім.38,85 макс.41,10	-	не перевищує -8	не перевищує 0
Технічний регламент	-	(25/20) °C мінім. 35,4  (25/0) °C мінім.38,0	(25/20) °C мінім.44,9 макс.53,7 (25/0) °C мінім.48,2 макс.57,7	-	-
Марш. 108	34,43	38,12	47,80	-7,47	-7,85
Марш. 171	34,3	38,05	49,89	-23,24	-17,94

Враховуючи викладене постає питання визначення точного складу природного газу та його енергетичної цінності. В залежності від того вищу чи нижчу теплоту згоряння використовувати при проведенні гідравлічних розрахунків газопроводів, можна отримати певну різницю в потрібних діаметрах. Що в свою чергу буде впливати на кінцеву вартість робіт по будівництву і реконструкції системи газопостачання. Це впливає на розуміння фактичної пропускної можливості газової мережі з врахуванням його реального складу.

Досліджені зразки газу з працюючої газової мережі м. Києва в інституті газу АН України. Результати цих досліджень опубліковано в [9].

Отримано значні розбіжності, що підтверджують факт істотної зміни як складу газу, так і його енергетичної цінності при відборі в різних точках газової мережі. Запропонована система вимірювання кількості газу в одиницях енергії, яка передбачає облік газу з місць його видобутку до споживача.

Зі складом газу, його енергетичними характеристиками можна ознайомитись на сайті Оператора ГТС. Ці дані періодично публікуються відповідно до регіону. Якщо в якості прикладу розглянути період з 07:00 01.03.2021р. по 07:00 01.04.2021р. то в Паспорті фізико-хімічних показників природного газу №171, що йде по газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» склад метану становить 95,9% [12], а в Паспорті ФХП № 108, що подається по газопроводах «Більськ-Солоха», «Більськ-Суми», склад метану – 85,99% [13].

Теплота спалювання та інші характеристики також змінюються. Так, число Воббе (основний показник якості газу за його теплотою згоряння) в першому випадку дорівнює 13,86 кВт·год/м<sup>3</sup>, а в другому - 13,28 кВт·год/м<sup>3</sup>.

Як бачимо, порівнюючи склад газу, який транспортується по маршрутах 108 і 171, не завжди дотримані всі нормативні вимоги. Зокрема, в маршруті 108 не дотримані норми по вмісту метану, етану та вуглекислого газу (табл. 2).

Також в цьому маршруті не дотримані вимоги по Числу Воббе і температурі точки роси вологи (P = 3.92 МПа) (табл.3), що є наслідком відхилення від нормативного компонентного складу газу.

ДБН «Газопостачання» рекомендує при виконанні гідравлічного розрахунку газопроводів приймати теплоту згоряння газу 34 МДж/м<sup>3</sup>. Але фактично, газ який транспортується газо-

вими мережами може мати інші значення цього показника. Наприклад, по маршруту 108 - теплоту згоряння нижчу - 34,43 і вищу - 38,12 МДж/м<sup>3</sup>.

Газові прилади що використовують природний газ як паливо запроектовані, в своїй переважній більшості, на використання нижчої теплоти згоряння. Враховуючи середній ККД приладів на рівні 85%, можемо визначити, що кількість теплоти, що використовується -  $34 \cdot 0,85 = 28,9$  МДж/м<sup>3</sup>.

Але нарахування за спожитий газ (згідно [6]), проводиться по вищій теплоті згоряння (38,12 МДж/м<sup>3</sup> для даного прикладу).

Фактично газові прилади ефективно використовують 28,9 МДж/м<sup>3</sup> з поданих

38,12 МДж/м<sup>3</sup>, що становить 75,8 %. Тобто фактично 24,2 % поданої енергії газу не використовується.

При проведенні гідравлічних розрахунків газових мереж достовірність отриманого результату також погіршується, так як фактична теплота є більшою за ту, що приймається ДБН.

Дуже важливо, щоб на всіх етапах руху газу в газотранспортній мережі України визначення кількості газу в одиницях енергії проводилося на підставі чітко визначеного показника, який враховується як при проектуванні газових мереж так і при нарахуванні оплати за кількість спожитого газу. В країнах ЄС цим показником є вища теплота згоряння. Тому для підвищення достовірності системи обліку в Україні доцільно було б також використовувати цей показник.

Важливим фактором при нарахуванні за спожитий газ крім точно визначеної енергетичної цінності газу є і точне приведення спожитого газу в об'ємних одиницях до стандартних умов з врахуванням температури газу та його надлишкового тиску.

Газотранспортна система України – одна з найпотужніших і найрозгалуженіших мереж газогонів в світі. При цьому потужність ГТС на вході 281 млрд м<sup>3</sup> в рік, а потужність на виході - 146 млрд м<sup>3</sup> в рік [14]. В 2021 році було заброньовано 44,4 млрд м<sup>3</sup> транзитних потужностей на точках виходу, але використано лише 41,6 млрд м<sup>3</sup>. Загалом потужності української ГТС було використано менш ніж на 30%. Транзит природного газу через ГТС України у 2019 році становив 89,6 млрд м<sup>3</sup>.

З врахуванням значної кількості газу, яка транспортується в газовій мережі країни економічний ефект при використанні вищої теплоти згоряння газу при визначенні його кількості на всіх етапах руху газу буде істотним.

Принципово змінюється картина при використанні газових приладів, що розраховані на вищу теплоту згоряння, так як ці прилади використовують додатково і енергію димових газів.

**Висновки.** На підставі проведеного аналізу можна зробити висновки, що на всіх етапах руху газу в газотранспортній мережі як при проектуванні газових мереж так і при нарахуванні оплати за кількість спожитого газу доцільно використовувати значення вищої теплоти згоряння газу.

Це призведе до наступних переваг:

1) зменшення об'єму будівельних робіт та діаметрів газопроводів при новому будівництві та реконструкції систем;

2) скорочення споживання газу за рахунок його більш повноцінного використання (зменшується об'єм спожитого газу та сума оплати за використаний газ);

3) зменшення залежності від імпортованого газу;

4) уніфікація процесу нарахувань за спожитий газ як в середині країни і при розрахунках з закордонними партнерами;

5) покращення якості повітря за рахунок зменшення шкідливих виділень, яке буде відбуватися при забезпеченні більшої повноти спалювання газу.

## Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2035р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвал. розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. №605-р. – URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=245234085](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085)
2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Закон України від 16.09.2014 р. № 1678-VII / Верховна Рада України. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011).
3. Кодекс газотранспортної системи, 2015. (Верховна Рада України). Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15/> (дата звернення 13.09.2021).
4. Технічного регламенту природного газу, затверджений Постановою КМУ від 13.07.2021р. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245556848&cat\\_id=167475](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245556848&cat_id=167475).
5. ДБН В.2.5-20-2018. Газопостачання / Мінрегіон України. – К.: Мінрегіон України, 2019. – 109 с.
6. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2022, № 5, ст.30. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1850-20#Text>.
7. Петришин І. Аналіз показників якості природного газу, які впливають на процес горіння / І. Петришин, В. Соколовський, Н. Петришин, І. Дарвай // Стандартизація, сертифікація, якість. 2012. №3. С.51-56.
8. Предун К.М. Оцінка якості природного газу як енергоносія на основі лінгвістичної інформації / К.М. Предун, О.І. Ободянська, Ю.Й. Франчук // Управління розвитком складних систем. – 2019. – №38. – С. 143–150.
9. Предун К.М. Удосконалення системи обліку природного газу в одиницях енергії / К.М. Предун, В.А. Коновалюк, Ю.Й. Франчук // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип.37. – К.:



КНУБА, 2021. – с. 62-66.

10. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Изд.-во стандартов, 1987. 2 с.

11. Стаскевич Н. Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н. Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. - Л.: Недра, 1990. - 762 с.

12. Паспорт фізико-хімічних показників природного газу №171 за період з 07:00 01.03.2021р. по 07:00 01.04.2021р. переданого Сумським ЛВУМГ ТОВ "Оператор ГТС України" та прийнятого АТ "СумиГаз" по газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» (УПУ) Вимірювальна хіміко-аналітична лабораторія Сумського ЛВУМГ Свідоцтво №09-002 чинне до 27.02.2022 р. URL: <https://tsoua.com/prozorist/yakist-gazu/>.

13. Паспорт фізико-хімічних показників природного газу №108 за період з 07:00 01.03.2021р. по 07:00 01.04.2021р. переданого Лубенським ЛВУМГ ТОВ «Оператор ГТС України» та прийнятого АТ «ПолтаваГаз» по газопроводах «Більськ-Солоха», «Більськ-Суми». Вимірювальна хіміко-аналітична лабораторія Сумського ЛВУМГ. Свідоцтво №09-002 чинне до 27.02.2022 р. URL: <https://tsoua.com/prozorist/yakist-gazu/>.

## References

1. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035r. «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». Skhval. rozporiadzhenniam KМУ vid 18.08.2017 r. №605-r.– URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=245234085](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085)

2. Uhoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony: Zakon Ukrainy vid 16.09.2014 r. № 1678-VII / Verkhovna Rada Ukrainy. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011).

3. Kodeks hazotransportnoi systemy, 2015. (Verkhovna Rada Ukrainy). Ofitsiinyi sait Verkhovnoi Rady Ukrainy. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15/> (дата звернення 13.09.2021).

4. Tekhnichnoho rehlementu pryrodnoho hazu, zatverdzhenyi Postanovoio KМУ vid 13.07.2021r. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245556848&cat\\_id=167475](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245556848&cat_id=167475).

5. DBN V.2.5-20-2018. Hazopostachannia / Minrehion Ukrainy. – К.: Minrehion Ukrainy, 2019. – 109 s.

6. Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo zaprovadzhennia na rynku pryrodnoho hazu obliku ta rozrakhunkiv za obsiahom hazu v odynyiakh enerhii». Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR), 2022, № 5, st.30. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1850-20#Text>.

7. Petryshyn I. Analiz pokaznykiv yakosti pryrodnoho hazu, yaki vplyvaiut na protses horinnia / I. Petryshyn, V. Sokolovskiy, N. Petryshyn, I. Darvai // Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist. 2012. №3. S.51-56.

8. Predun K.M. Otsinka yakosti pryrodnoho hazu yak enerhonosiia na osnovi linhvistychnoi informatsii / K.M. Predun, O.I. Obodianska, Yu.I. Franchuk // Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. – 2019. – №38. – S. 143–150.

9. Predun K.M. Udoskonalennia systemy obliku pryrodnoho hazu v odynyiakh enerhii / K.M. Predun, V.A. Konovaliuk, Yu.I. Franchuk // Ventyliatsiia, osvittleniia i tepl hazopostachannia: nauk. tekhn. zbirnyk. – Vyp.37. – К.: КНУБА, 2021. – с. 62-66.

10. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Изд.-во стандартов, 1987. 2 с.

11. Стаскевич Н. Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н. Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. - Л.: Недра, 1990. - 762 с.

12. Паспорт фізико-хімічних показників природного газу №171 за період з 07:00 01.03.2021р. по 07:00 01.04.2021р. переданого Сумським ЛВУМГ ТОВ "Оператор ГТС України" та прийнятого АТ "СумиГаз" по газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» (УПУ) Вимірювальна хіміко-аналітична лабораторія Сумського ЛВУМГ Свідоцтво №09-002 чинне до 27.02.2022 р. URL: <https://tsoua.com/prozorist/yakist-gazu/>.

13. Паспорт фізико-хімічних показників природного газу №108 за період з 07:00 01.03.2021р. по 07:00 01.04.2021р. переданого Лубенським ЛВУМГ ТОВ «Оператор ГТС України» та прийнятого АТ «ПолтаваГаз» по газопроводах «Більськ-Солоха», «Більськ-Суми». Вимірювальна хіміко-аналітична лабораторія Сумського ЛВУМГ. Свідоцтво №09-002 чинне до 27.02.2022 р. URL: <https://tsoua.com/prozorist/yakist-gazu/>.

UDK 696.2

## Influence of the heat of combustion on calculations during the transport and consumption of natural gas

V. Konovaliuk<sup>1</sup>, Yu. Franchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [konovaliuk.va@knuba.edu.ua](mailto:konovaliuk.va@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0001-5115-7188

<sup>2</sup>PhD, assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [franchuk.yy@knuba.edu.ua](mailto:franchuk.yy@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0002-7910-8705

*Abstract. Ukraine, as an independent state, has a market economy that works according to the requirements of the world natural gas market. Gas has become a commodity, that is, it has its own price depending on its quality and demand for it. Modern gas quality standards provide for the control of about thirty indicators. The efficiency of gas appliances has increased by about 25%. The requirement of accounting for gas in both volume units and energy units is established by law, similar to accounting in EU countries. When accounting for gas, the higher heat of combustion is used, that is, all the energy of the gas. But when conducting hydraulic calculations in the design and reconstruction of gas networks, values of lower heat of combustion are still used. When selecting gas-using equipment based on the data of the manufacturing plants, the performance characteristics of the devices, focused on lower combustion heat, are also indicated. There are differences in the approach to determining the energy component contained in a certain volume of gas in different sections of the gas transportation system. As a result, the amount of energy changes. It is proposed to use a higher heat of combustion not only when accounting for gas, but also when conducting calculations at all stages of gas movement along the gas transportation network, as well as when conducting hydraulic calculations of gas pipelines. Based on the analysis, it can be concluded that at all stages of gas movement in the gas transportation network, both when designing gas networks and when calculating payment for the amount of gas consumed, it is advisable to use the value of the higher heat of combustion of gas. This will lead to a reduction in the volume of construction work and the diameters of gas pipelines during new construction and reconstruction of systems, a reduction in gas consumption due to its more complete use, a decrease in dependence on imported gas, an improvement in air quality due to a decrease in harmful emissions, which will occur when ensuring greater completeness of gas combustion.*

*Key words: gas supply, higher heat of combustion, lower heat of combustion, gas accounting, gas qualit.*

УДК 697.133 + 699.86

## Особливості аналітичного розрахунку параметрів теплопередачі через багат шарову огорожувальну конструкцію в нестационарному режимі

О. М. Недбайло<sup>1</sup>, І. К. Божко<sup>2</sup>, В.О. Мартенюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, nan\_sashulya@ukr.net, професор, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: 0000-0003-1416-9651

<sup>2</sup>к.т.н., старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, bozhkoik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7458-0835

<sup>3</sup>аспірант, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна, vova.marteniuk.95@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9922-9221

*Запропонована система алгебраїчних рівнянь для розрахунку параметрів нестационарного складного теплообміну між приміщенням будівлі та довкіллям (з урахуванням теплового впливу інсоляції на поверхню огорожувальної конструкції), що дозволяє вирішити наступні завдання: розрахувати поле температур в складних, в конструктивному відношенні, багат шарових конструкціях, наприклад, коли розташування шарів дискретне; при вимірюванні температури в характерних точках (на стиках шарів і поверхнях конструкції), модель дозволяє визначити теплофізичні характеристики матеріалів, з шарів яких складається конструкція; при проведенні лабораторних випробувань дозволяє істотно скоротити їх довготривалість; при розв'язанні оберненої задачі безпосередньо визначити опір теплопередачі всієї багат шарової конструкції та окремих її шарів.*

*Ключові слова: багат шарова огорожувальна конструкція, нестационарний теплообмін, теплопередача, температурне поле.*

**Вступ.** Різноманітність методик розрахунку теплотехнічних параметрів теплового режиму приміщень з великою кількістю емпіричних коефіцієнтів є наслідком складності вирішення даної задачі в аналітичному вигляді. Це пояснюється нестационарністю двохвимірною температурного поля в огорожувальних конструкціях (ОК) будівлі, квазістационарністю процесів термостатування приміщень, неізотермічністю поверхні низькотемпературних опалювальних систем, а також впливом великої кількості фізичних факторів на результати розрахунку окремих значень. Розбіжність в результатах, що отримані за проаналізованими існуючими підходами в розрахунках досягає майже 40%. Також, окремим чином, слід відмітити відсутність прямого врахування цілорічної теплової дії інсоляції на огорожувальні конструкції.

**Актуальність роботи.** Науковий інтерес представляє спільне завдання розрахунку параметрів нестационарного теплообміну через багат шарову огорожувальну конструкцію, а також створення його математичної моделі, що дозволила б відзначити особливості ряду питань проектування таких конструкцій, таких як відповідність до регламентованої методики реальних умов експлуатації; зміну значень температури в конструкції при різних режимах експлуатації; розподіл температурного поля в складному конструктивному виконанні

огорожувальної конструкції.

**Останні дослідження та публікації.** В реальних умовах температура опалювальних приладів часто змінюється через різного роду об'єктивні та суб'єктивні фактори: аварійні ситуації, планові та позапланові зниження і підвищення температури теплоносія і т.і., а температура зовнішнього повітря майже ніколи не залишається постійною навіть протягом доби, таким чином, нестационарний теплообмін присутній практично завжди. Постійна зміна граничних умов обумовлює перманентний процес перерозподілу значень температури в товщі огорожувальної конструкції [1]. Розрізняють два варіанти умов нагрівання або охолодження: зміна температури і зміна теплового потоку на поверхні конструкції [2]. В реальних умовах теплопередачі через захисну конструкцію, змінюється температура поверхні, а тепловий потік, що надходить на поверхню стіни, змінюється в разі ступеневої зміни тепловіддачі нагрівальних приладів системи опалення [3, 4].

**Формулювання цілей статті.** Запропонована методика розрахунку теплотехнічних параметрів огорожувальної конструкції, що передбачає стаціонарний лінійний розподіл температури в кожному з шарів стіни, так як вважається, що приміщення опалюється регулярно, а температури холодного періоду року досить стабільні.

**Основна частина.** Розглядається тришарова панель (рис. 1). На ліву (внутрішню) площину I шару 1 подається тепловий потік  $q$ . Права площина IV шару 3 (зовнішня) умовно межує з довкіллям. Завдання полягає у визначенні зміни температури  $T(x, \tau)$  і теплового потоку  $q(x, \tau)$  в часі  $\tau$  і в просторі по товщині огорожі  $x$ . Точність інженерного розрахунку для будівельних конструкцій залежить від правильності обраних значень їх теплофізичних характеристик. При розрахунках зазвичай використовують два основні показники – коефіцієнти: теплопровідності  $\lambda$  і об'ємної теплоємності  $c\rho$ . Для лінійного рівняння теплопровідності при  $\lambda$  і  $c\rho = \text{const}$  вводять коефіцієнт температуропровідності  $a = \lambda / c\rho$ .

Для розв'язання такої задачі необхідно, щоб були задані:

- початкові умови, що визначають розподіл температури по товщині і на границях ОК в початковий момент часу;
- рівняння енергії, що описує процес теплопровідності через товщину конструкції;
- граничні умови, що визначають умови теплообміну на всіх характерних площинах.

Початкові умови можуть бути задані у вигляді рівняння, таблиці, графіка розподілу температури в момент початку процесу (при  $\tau=0$ ). У загальному випадку рівняння початкових умов має вигляд  $T=T(x, 0)$ , а рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

Для нашого випадку зручно записати систему лінійних диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами. Кожне рівняння записуємо для окремого  $i$ -го шару з додатковими граничними умовами на стиках шарів, вважаючи, що в межах кожного окремого шару  $\lambda_i$  і  $c_i\rho_i = \text{const}$  ( $i$  - номер шару)

$$\left. \begin{aligned} \text{шар 1: } c_1\rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} &= \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \text{шар 2: } c_2\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} &= \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \\ \text{шар 3: } c_3\rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial \tau} &= \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В площині II (між 1 і 2 шарами), виходячи з рівності значень теплових потоків і температур, задаються умови четвертого роду

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{\text{II}} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{\text{II}} \text{ або } q_1 = q_2 \\ T_1 \Big|_{\text{II}} &= T_2 \Big|_{\text{II}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

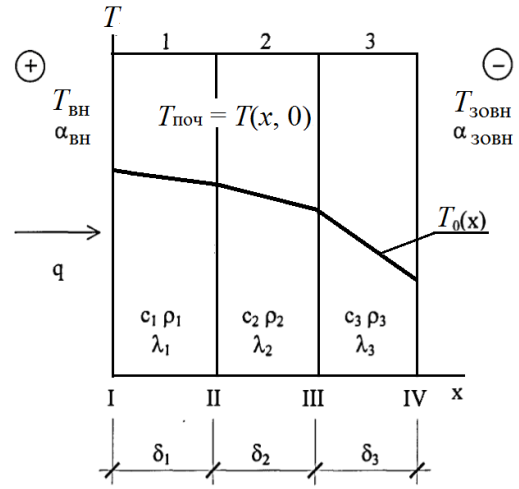


Рис. 1. Фізична постановка задачі

Аналогічно записуються граничні умови в площині III

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{\text{III}} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{\text{III}} \text{ або } q_2 = q_3 \\ T_2 \Big|_{\text{III}} &= T_3 \Big|_{\text{III}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Граничні умови теплообміну на площинах I і IV, тобто на внутрішній і зовнішній поверхнях ОК, що контактують, відповідно, з внутрішнім і зовнішнім повітрям, а також оточені іншими поверхнями: внутрішнє повітря з температурою  $T_{\text{вн}}$ , зовнішнє з температурою  $T_{\text{зовн}}$ . Внутрішня поверхня огорожувальної конструкції має температуру  $T_{\text{Р}}$ . Якщо враховувати конвективний і радіаційний види теплообміну, то в розрахунок вводяться, відповідно, коефіцієнти  $\alpha_{\text{конв}}$  і  $\alpha_{\text{рад}}$ . При наявності джерела теплоти, його радіаційна складова, що поглинається площиною I, визначається виразом

$$q_{\text{рад}} = \varepsilon q \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт поглинання поверхні ОК для теплового випромінювання,

$q$  – інтенсивність випромінювання, що припадає на ОК від джерела (довідкові дані, інтенсивність інсоляції для даної місцевості за метеоспостереженнями), Вт/м<sup>2</sup>.

Якщо розглядати загальний випадок, то на поверхні огорожень відбувається складний теплообмін, що визначається граничними умовами другого роду (задана інтенсивність теплового потоку) і третього роду (задані умови теплообміну з атмосферним повітрям). З огляду на це, граничні умови на площині I мають вигляд

$$\alpha_{\text{вн, конв}}(T_{\text{вн}} - T_{1|I}) + \alpha_{\text{вн, рад}}(T_{\text{R вн}} - T_{1|I}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_I \quad (6)$$

Граничні умови на площині IV записуються як

$$\alpha_{\text{зовн, конв}}(T_3|_{IV} - T_{\text{зовн}}) + \alpha_{\text{зовн, рад}}(T_3|_{IV} - T_{\text{R зовн}}) + \varepsilon_{\text{зовн}} q_{\text{зовн}} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{IV} \quad (7)$$

Для приміщень умови радіаційно-конвективного теплообміну в практиці будівельного проектування враховуються єдиним коефіцієнтом теплообміну  $\alpha_{\text{вн}}$ , тоді умова (6) набуде вигляду

$$\alpha_{\text{вн}}(T_{\text{н}} - T_{1|I}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_I \quad (8)$$

Для холодного періоду року в натурних дослідженнях, а також в лабораторних умовах при відсутності в приміщенні джерел теплоти (відсутність опалення в теплий період року), можна ввести аналогічне спрощення також і для зовнішньої поверхні досліджуваного об'єкту. Тоді (2.7) набуде вигляду

$$\alpha_{\text{зовн}}(T_3|_{IV} - T_{\text{зовн}}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{IV} \quad (9)$$

Цілорічно при натурних дослідженнях необхідно враховувати величину інсоляції, а при лабораторних, в холодний період – величину випромінювання опалювальних приладів.

Наступний вираз представляє змішані граничні умови другого і третього родів, що можна перетворити, використовуючи умовну температуру зовнішнього середовища  $T_y = T_{\text{зовн}} + \varepsilon_{\text{зовн}} q_{\text{зовн}} / \alpha_{\text{зовн}}$ , у вигляді

$$\alpha_{\text{зовн}}(T_y - T_3|_{IV}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{IV} \quad (10)$$

Розв'язання поставленого завдання викликає математичні складності, оскільки система рівнянь є нелінійною. Тому пропонується використання комбінованого методу дослідження крайових задач теплопереносу, що базується на основі поєднання елементів аналітичного і чисельного розв'язків. Суть методу полягає в тому, що весь процес теплопереносу розглядається на ряді малих часових інтервалів. У кожному проміжку часу допускається, що значення температури постійні в площинах II і III, а також

постійна густина теплового потоку через дотичні поверхні, тобто є ідеальний тепловий контакт.

Загальне завдання розбивається на три автономні, але взаємопов'язані між собою складові:

1. Теплоперенос в шарі 1 з граничними умовами третього роду, що враховують конвективний теплообмін на площині I, і першого роду, що характеризують сталість температури в площині II між шарами 1 і 2.

2. Теплоперенос в шарі 2 з граничними умовами другого роду, що характеризують сталість густини теплового потоку через площину II, і першого роду, що характеризують сталість температури в площині III.

3. Теплоперенос в шарі 3 з граничними умовами другого роду в площині III і граничними умовами третього роду, що характеризують теплообмін між поверхнею шару 3 на площині IV з навколишнім середовищем за законом Ньютона - Рихмана.

Кожне з цих завдань розв'язується аналітично. Розв'язок загальної задачі нестационарної теплопровідності можна отримати в результаті сполучення аналітичних розв'язків на кожному часовому інтервалі. Це дозволяє перейти від граничних умов четвертого роду до граничних умов першого і другого родів на поверхнях поділу шарів 1 і 2, 2 і 3, що взагалі полегшує розв'язання завдання.

Наведений алгоритм, що розроблений для тришарової конструкції [5]. У завданнях 1 і 3 розглянуті крайні (зовнішні) шари, в завданню 2 – середній шар. Не складає особливих труднощів поширити цей алгоритм на n-шарову конструкцію, тому що крайніми в n-шаровій конструкції будуть шари, що описані в задачах 1 і 3, а кожен проміжний (середній) шар описується завданням 2.

**Висновки.** Рівень сучасної комп'ютерної техніки та спеціального програмного забезпечення дозволяє швидко і точно вирішувати завдання теплопередачі через ОК, базуючись на всій сукупності кліматичних факторів, без введення будь-яких припущень і спрощень. Зокрема, досить точно врахувати вплив інсоляції завдяки інформації, що міститься в метеорологічних довідниках.

Розроблена математична модель дозволяє розв'язати наступні завдання:

- оцінити теплофізичний стан конструкцій, що проектуються для різних режимів експлуатації і, як наслідок, раціонально їх спроектувати

під конкретний режим або їх діапазон;  
- розрахувати поле температур в складних, в конструктивному відношенні, багат шарових конструкціях, наприклад, коли розташування шарів дискретне.

**Перспективи подальших досліджень.** На основі розробленої математичної моделі розглядається можливість розрахунку та оптимізації основних теплотехнічних параметрів багат шарових огорожувальних конструкцій тощо.

### Література

1. Фиалко Н.М., Черных Л.Ф. Тепловое состояние трехслойных наружных стен помещения при напольном электротеплоаккумуляционном отоплении. Промышленная теплотехника. 2004. Т. 26. № 5. С. 48 – 56.
2. Круковский П.Г., Пархоменко Г.А., Тадля О.Ю., Метель М.А. Идентификация параметров теплопотерь помещения по бесконтактным измерениям температур. Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31. №3. С. 46 – 55.
3. Басок Б.И., Накорчевский А.И. Моделирование теплопередачи через наружное ограждение зданий с учетом непрерывного действия климатических факторов. Строительные конструкции. Межведомственный научно-технический сборник. 2014. Выпуск 80. С. 113 – 120.
4. Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка Ю.И., Поволочко В.Б. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений. Харьков: Рубикон. 2001. 280 с.
5. Недбайло А.Н. Особенности теплопередачи через многослойную ограждающую конструкцию в нестационарном режиме. Керамика: наука и жизнь. №1(22). 2014. С. 4 – 9.

### References

1. Fialko N.M., Chernyih L.F. Teplovoe sostoyanie trehsloynnyih naruzhnyih sten pomescheniya pri napolnom elektroteploakkumulyatsionnom otoplenii. Promyishlennaya teplotekhnika. 2004. T. 26. №5. P. 48 – 56.
2. Krukovskiy P.G., Parhomenko G.A., Tadya O.Yu., Metel M.A. Identifikatsiya parametrov teplopoter pomescheniya po beskontaktnyim izmereniyam temperatur. Promyishlennaya teplotekhnika. 2009. T. 31. №3. P. 46 – 55.
3. Basok B.I., Nakorchevskiy A.I. Modelirovanie teploperedachi cherez naruzhnoe ograzhdenie zdaniy s uchetoм nepreryivnogo deystviya klimaticheskikh faktorov. Stroitelnyie konstruksii. Mezhvedomstvennyiy nauchno-tehnicheskii sbornik. 2014. Vyipusk 80. P. 113 – 120.
4. Malyarenko V.A., Redko A.F., Chayka Yu.I., Povolochko V.B. Stroitel'naya teplofizika ograzhdayuschih konstruksiy zdaniy i sooruzheniy. Harkov: Rubikon. 2001. 280 p.
5. Nedbailo A.N. Osobennosti teploperedachi cherez mnogoslouynuyu ograzhdayuschuyu konstruksiyu v nestatsionarnom rezhime. Keramika: nauka i zhizn. №1(22). 2014. P. 4 – 9.

UDC 697.133 + 699.86

## Peculiarities of the analytical calculation of heat transfer parameters through a multi-layer enclosing structure in non-stationary mode

O. Nedbailo<sup>1</sup>, I. Bozhko<sup>2</sup>, V. Marteniuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Scientist, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, Professor of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, nan\_sashulya@ukr.net,

ORCID: 0000-0003-1416-9651

<sup>2</sup> Ph.D., Senior Scientist, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, bozhkoik@gmail.com,

ORCID: 0000-0001-7458-0835

<sup>3</sup> Postgraduate PhD, National University of Food Technology, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0001-9922-9221

*Abstract. A system of algebraic equations is proposed for calculating the parameters of non-stationary complex heat exchange between the premises of the building and the environment (taking into account the thermal effect of insolation on the surface of the enclosing structure), which allows you to solve the following tasks: calculate the temperature field in complex, structurally, multilayered structures, for example, when the location discrete layers; when measuring the temperature at characteristic points (at the joints of layers and surfaces of the structure), the model allows you to determine the thermophysical characteristics of the materials from which the structure consists of layers; when conducting laboratory tests, it allows to significantly reduce their duration; when solving the inverse problem, directly determine the heat transfer*

*resistance of the entire multilayer structure and its individual layers. The level of modern computer technology and special software allows you to quickly and accurately solve the problem of heat transfer through the OC, based on the entire set of climatic factors, without introducing any assumptions and simplifications. In particular, it is quite accurate to take into account the influence of insolation thanks to the information contained in meteorological handbooks. The developed mathematical model allows solving the following tasks: to assess the thermophysical condition of structures designed for different modes of operation and, as a result, to rationally design them for a specific mode or their range; calculate the temperature field in structurally complex multi-layer structures, for example, when the arrangement of layers is discrete. On the basis of the developed mathematical model, the possibility of calculating and optimizing the main thermal parameters of multi-layer enclosing structures, etc. is considered.*

*Keywords: multi-layer enclosure structure, unsteady heat exchange, heat transfer, temperature field..*

▪

УДК 662.995+536.242

## Вдосконалення методів структурно-параметричної оптимізації в аналізі ґрунтових акумуляторів теплоти.

Човнюк Ю.В.<sup>1</sup>, Москвітін А.С.<sup>2</sup>, Пефтева І.О.<sup>3</sup><sup>3</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, uchovnyuk@ukr.net, ORCID:0000-0002-0608-0203.<sup>2</sup>к.т.н. ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID:0000-0003-3352-0646.<sup>3</sup>ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, piefteva.io@knuba.edu.ua, ORCID:0000-0002-8858-9010.

Акумулятори великої теплової ємності організуються у природному ґрунтовому масиві впорядкованого сукупністю («кущем») вертикальних/горизонтальних теплообмінників, розміщених або у бурових свердловинах, або всередині циліндричних порожнин бетонного масиву у трубах. У результаті акумулювання створюється основна область накопиченої теплоти, яка обмежена зовнішнім контуром «куща», певного об'єму й з певною температурою, а також буферна підобласть деякого об'єму, яка дотикається до основної і є результатом теплової взаємодії об'єму основної області з оточуючим ґрунтовим масивом, який має постійну температуру. Найменші розміри буферної підобласті будуть у випадку рівномірного по основному об'єму розподілу температури. Розміри буферної підобласті можна зменшувати, якщо створити верхній теплоізоляційний щит. При цьому габарити конструкції повинні бути оптимальними, тобто відповідати певному критерію, за якого відношення об'єму буферної підобласті до об'єму всього акумулятора теплоти є мінімальним. Наведений вдосконалений метод структурно-параметричної оптимізації ґрунтових акумуляторів теплоти в процесі аналізу їх функціонування. Визначені оптимальні співвідношення розмірів вказаних акумуляторів, які мають верхній теплоізоляційний щит (чи без нього), та розвинута методика, що дозволяє знаходити кількість теплообмінників, їх параметр і відстані між ними задля забезпечення мінімальних витрат на побудову акумулятора.

**Ключові слова:** ґрунтові акумулятори теплоти, теплоізоляційний щит, оптимізація конструкції акумулятора теплоти; сезонна акумуляція теплоти.

### Постановка задачі. Аналіз публікацій.

Акумулятори великої теплової ємності організуються у природному ґрунтовому масиві впорядкованою сукупністю («кущем») вертикальних теплообмінників, розміщених у бурових свердловинах [1-4]. У результаті акумулювання створюється основна область накопиченої теплоти, обмежена зовнішнім контуром «куща» об'ємом  $V_0 = XYZ$  й температурою  $T_0 = (t, x, y, z)$ , буферна підобласть об'ємом  $V_\delta$ , яка знаходиться впритул до основної і є результатом теплової взаємодії  $V_0$  з оточуючим новим масивом, який має температуру  $T_m \cong const$  (рис.1).

Для подальших розрахунків введемо наступні умовні позначення:  $a$  - коефіцієнт теплопровідності;  $d$  - діаметр труб;  $c$  - питома теплоємність;  $E$  - енергія;  $H$  - висота теплонезбуреного прошарку ґрунту;  $k$  - число бурових свердловин, теплообмінників;  $L$  - крок теплообмінників;  $m$  - число бурових свердловин на лінійному розмірі  $X$ ;  $N$  - потужність;  $n$  - число бурових свердловин на лінійному розмірі  $Y$ ;  $q$  - щільність теплового потоку;  $p$  - тиск;  $R$  - розмір туферної підобласті, радіус;  $t$  - час;  $V$  - об'єм;  $x, y, z$  - декартові координати;  $X, Y, Z$  - розміри основної області акумулятора;

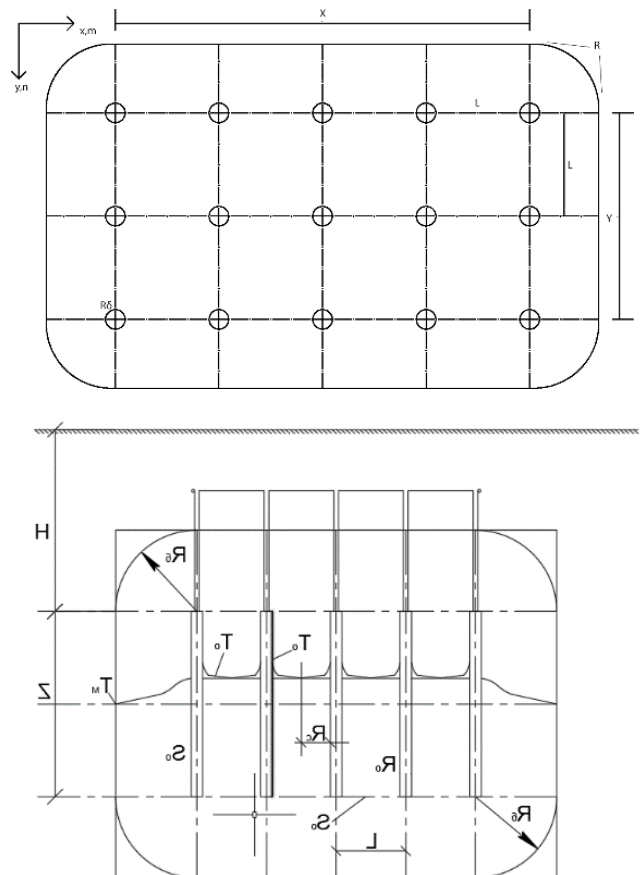


Рис.1. План та розріз ґрунтового акумулятора.



$C$  – вартість;  $\beta$  - коефіцієнт;  $\delta$  - товщина, товщина стінки труби;  $\gamma$  - коефіцієнт теплопровідності;  $X$  - відношення сторін акумулятора;  $b$  - припустиме напруження розтягу матеріалу труб;  $q$  - щільність;  $t$  - інтервал часу. Індекси:  $a$  - акумулятор;  $b$  - буферна підобласть.

Найменші розміри буферної підобласті будуть у випадку рівномірною по  $V_o$  розподілу температури  $T_o = (t)$ . Це зазвичай досягають організацію однакового теплового навантаження, що припадає на кожний теплообмінник, однакоvim типом останніх, незмінним кроком  $L$  їх розміщення у «кущі», однакоvim потенціалом проміжного теплоносія й малим перепадом його температур  $\Delta T_B = (T_{B,ВХ} - T_{B,ВИХ}) \sim 1^\circ\text{K}$  відповідно на вході і виході кожного теплообмінника і низкою інших вимог. Виконання цих умов не викликають особливих труднощів. Тоді об'єм акумулятора  $V_a$  та його енергетична здатність у момент часу  $t$  визначається наступними виразами:

$$\left\{ \begin{array}{l} V^a = V_o + V_b = X \cdot Y \cdot Z + \\ + 2(X \cdot Y + Y \cdot Z \cdot X) \cdot R_b + \\ + (X + Y + Z) \cdot \pi \cdot R_b^2 + \frac{4}{3} \cdot \pi R_b^3; \\ R_b = \sqrt{24 \cdot a_m \cdot t}; \\ \frac{(T - T_m)}{(T_o - T_m)} = (1 - 4)^3 \cdot (1 + 3\varphi) \\ \varphi = \frac{u}{R_b}, \quad (u = x \cdot y \cdot z). \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $u$  відраховується впродовж зовнішньої нормальні від граней і ребер основної області. При піврічному накопиченні теплоти значення  $t = r = 180 \text{ дїб} = 1,55510 \text{ с}$  і згідно (1) тепловміст акумулятора буде:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_a &= \tilde{V}_o + \tilde{V}_b = \\ &= X \cdot Y \cdot Z + 0,8(X \cdot Y + Y \cdot Z + Z \cdot X) \cdot R_b + \\ &+ 0,2\pi(X + Y + Z) \cdot R_b^2 + 0,1524 \cdot \pi R_b^3 \end{aligned} \quad (2)$$

де:

$$\tilde{V}_i = \frac{E_i}{\rho_m \cdot c_m \cdot (T_o - T_m)}, \quad (i = a, b) \quad (3)$$

У (2) враховано, що для основної області  $\tilde{V}_o = V_o$ .

**Мета роботи** полягає у обґрунтуванні вдосконаленої та уточненої методики структурно-параметричної (та техніко-економічної) оптимізації ґрунтових акумуляторів теплоти у процесах аналізу їх функціонування й практичної експлуатації.

**Виклад основного змісту дослідження.** Розміри буферної підобласті можуть бути зменшені при створенні верхнього теплоізоляційного щита (рис 2). При цьому зменшується глибина буріння свердловин на величину порядку  $H$  і відпадає необхідність теплоізоляції трубопроводів, які підводять й відводять теплоносії (рис.1). Розміри щита перевищують розміри  $X$  та  $Y$  основної області на  $R_\delta(\tau)$ , де  $\tau$  - тривалість циклу роботи акумулятора. Причому, враховуючи малий надлишковий температурний потенціал периферійної частини  $V_b$ , можна обмежитись  $R_\delta(\tau)$  при значенні  $\tau/2$ . Витрати на спорудження щита з пінобетону товщиною  $\delta \approx (0,1 \dots 0,3) \text{ м}$  і набагато менше вартості бурових робіт  $H \cdot k$ , де  $k$  - число свердловин. Розрахунки [8] показують, що теплові втрати через щит протягом року не перевищують 1%. Такий акумулятор характеризується залежностями:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = V_o + V_\delta = X \cdot Y \cdot Z + \\ + (X \cdot Y + 2 \cdot Y \cdot Z + 2 \cdot Z \cdot X) \cdot R_\delta + \\ + 0,5(X + Y + 2Z)R_\delta^2 + \frac{2}{3}\pi R_\delta^3; \\ \tilde{V}_a = \tilde{V}_o + \tilde{V}_\delta = X \cdot Y \cdot Z + \\ + 0,4(X \cdot Y + 2 \cdot Y \cdot Z + 2 \cdot Z \cdot X) \cdot R_\delta + \\ + 0,1\pi(X + Y + 2Z)R_\delta^2 + 0,0762\pi R_\delta^3; \end{array} \right. \quad (4)$$

Температурний потенціал буферної під області менше основної. Тому необхідно намагались реалізувати умови:

$$\frac{\tilde{V}_\delta}{\tilde{V}_a} = \frac{\tilde{V}_\delta}{\tilde{V}_o + \tilde{V}_\delta} = \frac{\varphi}{1 + \varphi} \rightarrow \min, \varphi = \frac{\tilde{V}_\delta}{\tilde{V}_o}. \quad (5)$$

Функція (5) монотонна й обмежена інтервалом  $[0,1]$  у всій області зміни  $\varphi \in [0, \infty]$ . Причому умова мінімуму  $\tilde{V}_b/\tilde{V}_a$  відповідає мінімуму  $\varphi$ .

Умова екстремуму функції :

$$\begin{aligned} \text{а) необхідна: } f'(\varphi) = 0 &\Rightarrow \left[ \frac{\varphi}{1+\varphi} \right]' = \\ &= \frac{1 \cdot (1+\varphi) - \varphi \cdot 1}{(1+\varphi)^2} = 0; \frac{1}{(1+\varphi)^2} = 0, \rightarrow \varphi \rightarrow 0 \end{aligned}$$

тому  $\min$  реальний  $f(\varphi)$  досягаються при  $\varphi = 0$ , тобто  $f(0) = 0$  і є  $\min$ , бо при  $\varphi \rightarrow \infty f(\varphi) \rightarrow 1$ . Графік  $f(\varphi)$  рис.3.

Співвідношення розмірів  $X, Y$  майданчика для розміщення теплообмінників залежить від місцевих умов й може бути будь-яким. Тому слід прийняти:

$$Y = x \cdot X \quad (6)$$

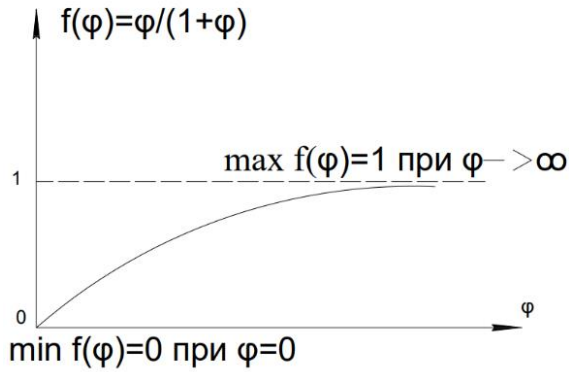


Рис.3. Графік  $f(\varphi)$

Тоді висота  $Z$  основної області акумулювання буде:

$$Z = \frac{V_o}{x \cdot X^2} \quad (7)$$

Після підстановки (6), (7) у (2) й (4) матимемо:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\tilde{V}_\delta}{\tilde{V}_o} = 0,8 \left\{ \frac{x \cdot X^2}{V_o} + \frac{1}{X} + \frac{1}{x \cdot X} \right\} \cdot R_\delta + \\ + 0,2\pi \left\{ \frac{X}{V_o} + \frac{x \cdot X}{V_o} + \frac{1}{x \cdot X^2} \right\} R_\delta^2 + \frac{0,1524}{V_o} \pi R_\delta^3 \\ \varphi_{щ} = \frac{\tilde{V}_\delta}{\tilde{V}_o} = 0,4 \left\{ \frac{x \cdot X^2}{V_o} + \frac{2}{X} + \frac{2}{x \cdot X} \right\} \cdot R_\delta + \\ + 0,1\pi \left\{ \frac{X}{V_o} + \frac{x \cdot X}{V_o} + \frac{2}{x \cdot X^2} \right\} R_\delta^2 + \frac{0,0762}{V_o} \pi R_\delta^3; \end{cases} \quad (8)$$

Дослідження на екстремум відповідно функцій  $\varphi(X)$  та  $\varphi_{щ}(X)$  призводить до рівнянь четвертого степеня:

$$\begin{cases} \frac{1,6 \cdot x}{V_o} \cdot X^4 + \frac{0,2\pi \cdot R_\delta \cdot (1+x)}{V_o} \cdot X^3 - \\ - 0,8 \left( 1 + \frac{1}{x} \right) \cdot X - \frac{0,4\pi}{x} R_\delta = 0; \\ \frac{0,8 \cdot x}{V_o} \cdot X^4 + \frac{0,1\pi \cdot R_\delta \cdot (1+x)}{V_o} \cdot X^3 - \\ - 0,8 \left( 1 + \frac{1}{x} \right) \cdot X - \frac{0,4\pi}{x} R_\delta = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Легко показати, що другі похідні по  $X$  виразів (8) завжди додатні й, відповідно, розв'язки рівнянь (9) (як необхідних умов екстремуму функцій (8)) відповідають мінімуму  $\varphi(X)$  та  $\varphi_{щ}(X)$ .

Проаналізуємо рівняння (9) для кількох частинних випадків.

А.  $x = 1$  (квадратна форма майданчика «куща»). У [8] розглянутий саме цей випадок. Рівняння (9) зводяться до наступного виду:

$$\begin{cases} \left( \frac{1}{V_o} - \frac{1}{X^3} \right) \cdot (1,6 \cdot X + 0,4 \cdot \pi \cdot R_\delta) = 0; \\ \left( \frac{1}{2V_o} - \frac{1}{X^3} \right) \cdot (1,6 \cdot X + 0,4 \cdot \pi \cdot R_\delta) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Тоді дійсні корені (10), що не залежать від  $R_\delta$  мають вид:

$$\begin{cases} X = Y = Z = V_o^{1/3}; \\ X_{щ} = Y_{щ} = \sqrt[3]{2V_o} \approx 1,26 \cdot V_o^{1/3}; \\ Z_{щ} = 0,5 \cdot X_{щ} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{2V_o} \approx 0,63 \cdot V_o^{1/3}. \end{cases} \quad (11)$$

Висновок: отже, оптимальна форма квадратного у плані «куща» відповідає кубу, а за наявності щита – прямокутному параллелепіпеду з висотою, яка дорівнює половині сторони квадрату. Останній результат приваблює тією обставиною [8], що глибина буріння свердловин часто обмежується санітарними міркуваннями по відношенню до водо насичених горизонтів, що експлуатуються. Наприклад, у Києві для буріння свердловин на глибину більше 50 м необхідний спеціальний дозвіл. Тому акумулятор з тепло ізолюючим щитом у таких випадках є просто незамінним.

Б. Мінімізація обмежувальної поверхні  $S_o$  основної області акумулювання.

Питання про оптимальну форму «куща» можна наближено вирішити саме з позицій мінімізації  $S_o$ , оскільки саме через цю поверхню  $S_o$  «дрейфує» теплота у оточуючий ґрунтовий масив. Використовуючи представлення (6) та (7), матимемо:

$$\begin{cases} \Phi(X) = \frac{S_o}{V_o} = 2 \cdot \left[ \frac{x \cdot X^2}{V_o} + \left( 1 + \frac{1}{x} \right) \cdot \frac{1}{X} \right]; \\ \Phi_{щ}(X) = \frac{S_o}{V_o} = \frac{x \cdot X^2}{V_o} + 2 \left( 1 + \frac{1}{x} \right) \cdot \frac{1}{X}. \end{cases} \quad (12)$$

Дослідження на екстремум  $\Phi(X)$  й  $\Phi_{щ}(X)$  дають:

$$\begin{cases} X = V_o^{1/3} \cdot \left( \frac{1 + \frac{1}{x}}{2x} \right)^{1/3}; Y = x \cdot V_o^{1/3} \cdot \left( \frac{1 + \frac{1}{x}}{2x} \right)^{1/3}; \\ Z = \frac{V_o^{1/3}}{x} \cdot \left( \frac{2x}{1 + \frac{1}{x}} \right)^{2/3}; X_{щ} = V_o^{1/3} \cdot \left( \frac{1 + \frac{1}{x}}{x} \right)^{1/3}; \\ Y_{щ} = x \cdot V_o^{1/3} \cdot \left( \frac{1 + \frac{1}{x}}{x} \right)^{1/3}; Z_{щ} = \frac{V_o^{1/3}}{x} \cdot \left( \frac{x}{1 + \frac{1}{x}} \right)^{2/3} \end{cases} \quad (13)$$

Легко показати, що (13) відповідає  $\Phi(X)$  й  $\Phi_{щ}(X)$ . При  $x = 1$  результати співпадають із розрахунками по (9) й (11). Функціями (13) можна користуватись при оціночних розрахунках.

Розв'язки, які отримані для випадків А та Б, дозволяють стверджувати наступне: у результаті розв'язку оптимізаційних задач отримані вирази для  $X, Y, Z$  як функцій від  $V_o$ . Підстанов-

ка їх у залежності (2) чи (4) при відомих  $x, \tau, a_m$ , дає рівняння  $\tilde{V}_a = f(V_o)$ , котре однозначно визначає  $V_o$ , коли задане значення  $\tilde{V}_a$ . Якщо немає обмежень по відношенню до форми майданчика «куща» слід намагатись досягати за параметром  $x$  величини  $1(x = 1)$ .

В. Оптимізація структури ґрунтового акумулятора на основі розв'язку рівнянь (9).

Введемо значення:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1,6 \cdot x}{V_o} = a_1; \\ \frac{0,2\pi \cdot R_\delta \cdot (1+x)}{V_o} = b_1; c_1 = 0; \\ d_1 = -0,8 \cdot \left(1 + \frac{1}{x}\right); e_1 = -\frac{0,4\pi}{x} R_\delta. \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{0,8 \cdot x}{V_o} = a_2; \frac{0,1\pi \cdot R_\delta \cdot (1+x)}{V_o} = b_2; \\ c_2 = 0; d_2 = -0,8 \cdot \left(1 + \frac{1}{x}\right); e_2 = -\frac{0,4\pi}{x} R_\delta. \end{array} \right. \quad (15)$$

Тоді рівняння (9) можна записати наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 \cdot X^4 + b_1 \cdot X^3 + d_1 \cdot X + e_1 = 0; \\ a_2 \cdot X^4 + b_2 \cdot X^3 + d_2 \cdot X + e_2 = 0; \end{array} \right. \quad (16)$$

Для розв'язування рівнянь (16) використаємо підхід роботи [9]. Будемо розв'язувати методом цієї роботи перше рівняння (16), друге розв'язується аналогічно (з заміною індексів "1" → "2").

Зробимо заміну змінних у першому рівнянні системи (16):

$$\tilde{y}_1 = X + \frac{b_1}{4a_1}. \quad (17)$$

Тоді ще рівняння прийде у приведене рівняння:

$$\tilde{y}_1^4 + \tilde{p}_1 \cdot \tilde{y}_1^2 + \tilde{q}_1 \cdot \tilde{y}_1 + \tilde{r}_1 = 0, \quad (18)$$

де:  $\tilde{p}_1, \tilde{q}_1, \tilde{r}_1$  - раціональні функції коефіцієнтів  $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1$  а саме:

«технологія отримання» значень  $\tilde{p}_1, \tilde{q}_1, \tilde{r}_1$ :

$$a_1 X^4 + b_1 X^3 + d_1 X + e_1 = 0; \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow X^4 + \frac{b_1}{a_1} X^3 + \frac{d_1}{a_1} X + \frac{e_1}{a_1} = 0 (*)$$

$$\tilde{y}_1 = X + \frac{b_1}{4a_1}; \Leftrightarrow X = \tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1};$$

Підставляємо цю заміну у рівняння, тоді маємо:

$$\left(\tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}\right)^4 + \frac{b_1}{a_1} \left(\tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}\right)^3 + \frac{d_1}{a_1} \left(\tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}\right) + \frac{e_1}{a_1} = 0;$$

$$\left(\tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}\right)^3 =$$

$$= \tilde{y}_1^3 - 3\tilde{y}_1^2 \frac{b_1}{4a_1} + 3\tilde{y}_1 \left(\frac{b_1}{4a_1}\right)^2 - \left(\frac{b_1}{4a_1}\right)^3 =$$

$$= \tilde{y}_1^3 - \frac{3b_1}{4a_1} \tilde{y}_1^2 + \frac{3b_1^2}{16a_1^2} \tilde{y}_1 - \frac{b_1^3}{64a_1^3};$$

$$\frac{d_1}{a_1} \left(\tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}\right) = \frac{d_1}{a_1} \tilde{y}_1 - \frac{d_1 b_1}{4a_1^2};$$

$$\left(\tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}\right)^2 = \tilde{y}_1^2 - 2\tilde{y}_1 \frac{b_1}{4a_1} + \frac{b_1^2}{16a_1^2} =$$

$$= \tilde{y}_1^2 - \tilde{y}_1 \frac{b_1}{2a_1} + \frac{b_1^2}{16a_1^2};$$

$$\left(\tilde{y}_1^2 - \tilde{y}_1 \frac{b_1}{2a_1} + \frac{b_1^2}{16a_1^2}\right)^2 = \tilde{y}_1^4 + \tilde{y}_1^2 \frac{b_1^2}{4a_1^2} +$$

$$+ \frac{b_1^4}{256a_1^4} - 2\tilde{y}_1^3 \frac{b_1}{2a_1} + 2\tilde{y}_1^2 \frac{b_1^2}{16a_1^2} - 2\tilde{y}_1 \frac{b_1^3}{32a_1^3} =$$

$$= \tilde{y}_1^4 + \tilde{y}_1^3 \frac{b_1}{a_1} + \tilde{y}_1^2 \frac{3b_1^2}{8a_1^2} - \tilde{y}_1 \frac{b_1^3}{16a_1^3} + \frac{b_1^4}{256a_1^4};$$

Тепер замість рівняння (\*) наступне маємо для  $\tilde{y}_1$ :

$$\tilde{y}_1^4 + \tilde{y}_1^3 \frac{b_1}{a_1} + \tilde{y}_1^2 \frac{3b_1^2}{8a_1^2} - \tilde{y}_1 \frac{b_1^3}{16a_1^3} + \frac{b_1^4}{256a_1^4} +$$

$$+ \frac{b_1}{a_1} \tilde{y}_1^3 - \frac{b_1}{a_1} \cdot \frac{3b_1}{4a_1} \tilde{y}_1^2 + \frac{b_1}{a_1} \cdot \frac{b_1^3}{16a_1^3} \tilde{y}_1 - \frac{b_1}{a_1} \cdot \frac{b_1^3}{64a_1^3} =$$

$$= \frac{d_1}{a_1} \tilde{y}_1 - \frac{d_1 b_1}{4a_1^2} + \frac{e_1}{a_1} = 0;$$

$$\tilde{y}_1^4 + \tilde{y}_1^2 \left\{ \frac{3b_1^2}{8a_1^2} - \frac{3b_1^2}{4a_1^2} \right\} +$$

$$+ \tilde{y}_1 \left\{ -\frac{b_1^3}{16a_1^3} + \frac{3b_1^3}{16a_1^3} + \frac{d_1}{a_1} \right\} +$$

$$+ \left\{ \frac{b_1^4}{256a_1^4} - \frac{b_1^4}{64a_1^4} - \frac{d_1 b_1}{4a_1^2} + \frac{e_1}{a_1} \right\} = 0;$$

Або:

$$\tilde{y}_1^4 + \tilde{y}_1^2 \left\{ -\frac{3b_1^2}{8a_1^2} \right\} + \tilde{y}_1 \left\{ \frac{b_1^3}{8a_1^3} + \frac{d_1}{a_1} \right\} +$$

$$+ \left\{ -\frac{b_1^4}{256a_1^4} - \frac{d_1 b_1}{4a_1^2} + \frac{e_1}{a_1} \right\} = 0.$$

Отже:

$$\tilde{p}_1 = -\frac{3b_1^2}{8a_1^2}; \tilde{q}_1 = \frac{b_1^3}{8a_1^3} + \frac{d_1}{a_1}; \quad (19)$$

$$\tilde{r}_1 = -\frac{b_1^4}{256a_1^4} - \frac{d_1 b_1}{4a_1^2} + \frac{e_1}{a_1}$$

Вид розв'язку рівняння (18) з коефіцієнтами (19) залежить від виду розв'язку його кубічної резольвенти:

$$\tilde{z}^3 + 2\tilde{p}_1 \tilde{z}^2 + (\tilde{p}^2 - 4\tilde{r}^2) \tilde{z} - \tilde{q}^2 = 0. \quad (20)$$

Область зміни невідомого у загальному випадку є множиною  $C$  комплексних чисел, дані для розрахунку зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Кубічна	Рівняння 4-го степеня
1. Усі корені дійсні і додатні	1. Чотири дійсних кореня
2. Усі корені дійсні, з них один додатній і два від'ємних	2. Дві пари комплексно спряжених коренів.
3. Один корінь дійсний і два комплексно спряжених кореня	3. Два дійсних кореня і два комплексно спряжених кореня

Виходячи з цієї таблиці нас у подальшому будуть цікавити (щодо кубічної резольвенти) лише 2 випадки, а саме: перший і третій.

Отже, досліджуємо розв'язки рівняння (20) Записуємо його у наступному виді:

$$\bar{z}^3 + \bar{b}\bar{z}^2 + \bar{c}\bar{z} - \bar{d} = 0, \quad (21)$$

де:  $\bar{b}=2\bar{p}_1$ ;  $\bar{c} = (\bar{p}^2 - 4\bar{r}^2)$ ;  $\bar{d} = -\bar{q}^2$ . У (21) коефіцієнт при  $\bar{z}^3$  має значення  $\bar{a} = 1$ . Тому, згідно [9], запишемо рівняння (21) таким чином:

$$\bar{z}^3 + r\bar{z}^2 + s\bar{z} + t = 0, \quad (22)$$

де:  $r = \bar{b} = 2\bar{p}_1$ ;  $s = \bar{c} = (\bar{p}^2 - 4\bar{r}^2)$ ;  $t = \bar{d} = -\bar{q}^2$ .

Зробимо у рівнянні (22) заміну невідомого:

$$\bar{y} = \bar{z} + \left(\frac{r}{3}\right); \left(\bar{z} = \bar{y} - \frac{r}{3}\right), \text{ тоді отримаємо}$$

т.з. приведені рівняння:

$$(\bar{y})^3 + \bar{p} \cdot \bar{y} + \bar{q} = 0, \quad (23)$$

де:  $\bar{p} = \frac{3 \cdot s - r^2}{3}$ ;  $\bar{q} = \frac{2r^3}{27} - \frac{r \cdot s}{3} + t$

Число дійсних розв'язків кубічного рівняння (23) залежить від знаку дискримінанта  $D = (\bar{p}/3)^3 + (\bar{q}/2)^2$ . При цьому, якщо  $D > 0$  матимемо один дійсний корінь й два комплексно спряжених, що відповідає двом дійсним кореням й двом комплексно спряженим кореням рівняння 4-го степеня (18) й, відповідно (першого) системи (16).

Якщо ж  $D < 0$  матимемо три дійсних кореня рівняння (23), а, відповідно, чотири дійсних кореня рівнянь (18) й (16). (При цьому корені (23) повинні бути усі додатними).

Звідси маємо наступну ситуацію (таблиця 2) для розв'язку рівняння (16).

Корені (18) знаходимо за наступним алгоритмом:

1) знаходимо спочатку корені  $\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3$  кубі-

чної резольвенти (20), використовуючи формулу Кардано; спочатку переписуємо (20) у формі (22), а потім за допомогою заміни зводимо до приведеного рівняння (23), котре має наступні розв'язки:

Отже, «логічний ланцюг» розв'язку рівнянь (16) (наприклад, першого з системи (16)) має вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (16) \\ (4 - \text{го степеня}) \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (18) \\ \text{приведене} \\ (4 - \text{го степеня}) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (20) \\ \text{кубічна} \\ \text{резольвента} \\ (3 - \text{го степеня}) \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (23) \\ \text{приведене} \\ \text{кубічне} \\ (3 - \text{го степеня}) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

Саме для цього рівняння застосовується формула Кардано, а потім у зворотньому напрямку знаходимо розв'язки (16).

Розпишемо етапи знаходження цих коренів.

Є дві ситуації: А.  $D > 0$ ; Б.  $D < 0$ .

Починаємо з ситуації А.

$$D > 0 \Rightarrow \left(\frac{\bar{p}}{3}\right)^3 + \left(\frac{\bar{q}}{2}\right)^2 > 0. \quad (24)$$

Корені (23) рівняння знаходимо по формулі Кардано:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_1 = u + v; \\ \bar{y}_2 = -\frac{(u+v)}{2} + \frac{(u-v)}{2} \cdot i\sqrt{3} \\ i^2 = -1; \\ \bar{y}_3 = -\frac{(u+v)}{2} - \frac{(u-v)}{2} \cdot i\sqrt{3}, \end{array} \right. \quad (25)$$

де  $u = \sqrt[3]{-\frac{\bar{q}}{2} + \sqrt{D}}$ ;  $v = \sqrt[3]{-\frac{\bar{q}}{2} - \sqrt{D}}$ ;

$$D = \left(\frac{\bar{p}}{3}\right)^3 + \left(\frac{\bar{q}}{2}\right)^2.$$

Таблиця 2.

Рівняння (23)	Рівняння системи (16)
$D > 0$ , один дійсний корінь.	Два дійсних кореня (обираємо ті, що $> 0$ )
$D < 0$ , три дійсних кореня (і всі додатні)	Чотири дійсних кореня (обираємо ті, що $> 0$ )

Шляхом заміни:  $\tilde{z}_j = \bar{y}_j - \frac{r}{3}$ ,  $j = (\overline{1,3})$ , знайдемо три кореня рівняння (20), (21), (22).

Далі знаходимо корені приведенного рівняння (18) за формулами Феррарі:

$$\begin{cases} \tilde{y}_1 = (\sqrt{\tilde{z}_1} + \sqrt{\tilde{z}_2} + \sqrt{\tilde{z}_3})/2; \\ \tilde{y}_2 = (\sqrt{\tilde{z}_1} - \sqrt{\tilde{z}_2} - \sqrt{\tilde{z}_3})/2; \\ \tilde{y}_3 = (-\sqrt{\tilde{z}_1} + \sqrt{\tilde{z}_2} - \sqrt{\tilde{z}_3})/2; \\ \tilde{y}_4 = (-\sqrt{\tilde{z}_1} - \sqrt{\tilde{z}_2} + \sqrt{\tilde{z}_3})/2. \end{cases} \quad (26)$$

При цьому знаки перед радикалами обираємо таким чином, щоб виконувалась рівність:

$$\sqrt{\tilde{z}_1} \cdot \sqrt{\tilde{z}_2} \cdot \sqrt{\tilde{z}_3} = -\tilde{q}_1. \quad (27)$$

Далі, шляхом заміни:

$$X_{j^*} = \tilde{y}_{j^*} - \frac{b_1}{4a_1}, \quad j^* = (\overline{1,4}), \quad (28)$$

Знаходимо розв'язки вихідного рівняння 4-го степеня, тобто першого рівняння системи (16).

У випадку А серед дійсних коренів (16) залишаються у цьому разі лише  $j^* = (1,2)$ , тобто перші два. З них, у свою чергу, обираємо тільки той, котрий є достатнім.

Розглянемо ситуацію Б:

$$D < 0 \Rightarrow \left(\frac{\bar{p}}{3}\right)^3 + \left(\frac{\bar{q}}{2}\right)^2 < 0$$

Корені (23) рівняння знаходимо по формулам, наведеним у [9]. Покладемо:

$$\bar{\rho} = \sqrt{(-\bar{p})^3/27}, \quad \cos\varphi = -\bar{q}/(2\bar{\rho}). \quad (29)$$

Тоді розв'язками приведенного рівняння (23) третього степеня є наступні:

$$\begin{cases} \bar{y}_1 = 2 \cdot \sqrt[3]{\bar{\rho}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right); \\ \bar{y}_2 = 2 \cdot \sqrt[3]{\bar{\rho}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{2\pi}{3}\right); \\ \bar{y}_3 = \bar{y}_2 = 2 \cdot \sqrt[3]{\bar{\rho}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{4\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (30)$$

Від котрих шляхом заміни:

$$\bar{z}_{j^*} = \tilde{y}_{j^*} - \frac{r}{3}, \quad j = (\overline{1,3}) \quad (31)$$

Знайдемо три кореня рівняння (20), (21), (22).

Далі по формулам Феррарі (26) знаходимо корені приведенного рівняння 4-го степеня (18), задовольняючи умові (27).

Далі шляхом заміни (28) знаходимо розв'язки вихідного (першого) рівняння системи (16).

Вище наведений розв'язок задачі у найбільш загальному випадку.

Розглянемо нижче конкретний частинний випадок. Нехай виконуються наступні умови:

$$\begin{cases} D < 0 \Leftrightarrow \left(\frac{\bar{p}}{3}\right)^3 + \left(\frac{\bar{q}}{2}\right)^2 < 0; \\ \tilde{z}_j > 0; \quad j = (\overline{1,3}) \\ \tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1} > 0; \quad \tilde{y}_2 - \frac{b_1}{4a_1} < 0; \\ \tilde{y}_3 - \frac{b_1}{4a_1} < 0; \quad \tilde{y}_4 - \frac{b_1}{4a_1} < 0 \end{cases} \quad (32)$$

Тоді за фізичним змістом залишається лише один розв'язок (16) (першого рівняння):

$$X_1 = \tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1}. \quad (33)$$

Визначимо  $X$ , для цього випадку у повному розгорнутому виді.  $Min$  досягаються (для першого рівняння системи (16)) при наступному значенні  $X$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= \tilde{y}_1 - \frac{b_1}{4a_1} = \\ &= \left\{ \frac{\sqrt{\tilde{z}_1} + \sqrt{\tilde{z}_2} + \sqrt{\tilde{z}_3}}{2} \right\} - \frac{b_1}{4a_1} = \\ &= \left\{ \frac{\sqrt{\bar{y}_1 - \frac{r}{3}} + \sqrt{\bar{y}_2 - \frac{r}{3}} + \sqrt{\bar{y}_3 - \frac{r}{3}}}{2} \right\} - \frac{b_1}{4a_1} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{2 \cdot \sqrt[3]{\bar{\rho}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) - \frac{r}{3}} + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{2 \cdot \sqrt[3]{\bar{\rho}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{r}{3}} + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{2 \cdot \sqrt[3]{\bar{\rho}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{r}{3}} \right\} - \frac{b_1}{4a_1} \end{aligned} \quad (34)$$

$(\varphi, \rho)$  визначаються з (29),  $\bar{p}, \bar{q}$  зазначені у (23),  $r, s$  визначене у (22),  $(a_1, b_1)$  - у (14), всі інші коефіцієнти у (18-22) й  $(d_1, e_1)$  - у (14).

Акумуляовану енергію можна подати у формі

$$E_a = N \cdot \tau_a, \quad (35)$$

де потужність акумулявання  $N$  пов'язана зі щільністю теплового потоку  $q_o$  на зовнішній поверхні теплообмінника радіусом  $R_o$  й числом «ефективно» працюючих теплообмінників  $k_a$ , які визначаються по величині теплообмінної поверхні з тепловим потоком, спрямованим всередину основної області акумулявання, за допомогою рівняння:

$$N = q_o 2\pi R_o \cdot k_a \cdot Z \quad (36)$$

Щоб запобігти значним перепадам температур між проміжним теплоносієм й основною областю акумулявання слід обмежити  $q_o \sim 100 \text{ Вт/м}^2$ . За заданого значення  $q_o$  з (36) впливає співвідношення:

$$k_a \cdot R_o = \frac{N}{2\pi \cdot Z \cdot q_o} \quad (37)$$

яка зв'язує  $k_a$  з величиною  $R_o$ , коли значення правої частини (37) відоме. У свою чергу при  $x = 1$  маємо залежності:

$$m = \sqrt{k_a} + 1, k = m^2, L = \frac{X}{m - 1} \quad (38)$$

що визначають число бурових свердловин  $m$  на лінійному розмірі  $X$ , загальне число бурових свердловин у акумуляторі  $k$  й крок свердловин  $L$ . Варіюючи значеннями  $k_a$  та  $R_o$ , встановлюються прийнятні величини, подані у (38). Таким чином, чином співвідношення (35)-(38) визначають всі параметри ґрунтового акумулятора заданої продуктивності.

Вартість створення акумулятора залежить, головним чином, від вартості бурових робіт  $C_{\delta y}$  й вартості теплообмінників  $C_{TO}$ . У результаті опитування підрядних організацій виявилось, що вартість бурових робіт не залежить від діаметру бурової свердловини й визначається витратами  $\Pi_{\delta y}$  на 1 погонний метр буріння:

$$C_{\delta y} = k \cdot Z \cdot \Pi_{\delta y} \quad (39)$$

Згідно з аналізом цін полімерних труб, з котрих виготовляють теплообмінники, вартість одного погонного метру труби даного сортаменту пропорційна площі поперечного перерізу власне труби, тобто ціна труби визначається вартістю матеріалу, що витрачається на її виготовлення. Відповідно, вартість теплообмінників, наприклад, оптимальної 12-трубної конструкції [5,6], виготовленої з труб діаметром  $d$  з товщиною стінки  $\delta$ , при ціні  $m^3$  матеріалу труби  $\Pi_T$  буде:

$$C_{TO} = 12\pi \cdot d \cdot \delta \cdot k_a \cdot Z \cdot \Pi_T \quad (40)$$

Згідно з [5] маємо співвідношення:

$$d = 0,4 \cdot R_o, \quad \delta = \frac{p \cdot d}{2\sigma}. \quad (41)$$

Із урахування (41) вираз (40) можна подати :

$$C_{TO} = \tilde{a}_1 \cdot R_o^2 k_a \cdot Z \cdot \Pi_T; \quad \tilde{a}_1 = 0,96\pi \frac{p}{\sigma} \quad (42)$$

Згідно з (38) маємо:

$$k = k_a + 2\sqrt{k_a} + 1 = (\sqrt{k_a} + 1)^2 \quad (43)$$

Тоді сумарну вартість акумуляторів  $C = C_{TO} + C_{\delta y}$  можна подати співвідношенням:

$$\frac{C}{Z\Pi_{\delta y}} = k_a + 2k_a^{1/2} + 1 + \frac{\beta}{k_a} = f(k_a), \quad (44)$$

$$\beta = \tilde{a}_1 \cdot \bar{b}^2 \cdot \frac{\Pi_T}{\Pi_{\delta y}}, \quad \bar{b} = \frac{N}{2\pi Z q_o} \quad (45)$$

Легко впевнитись, що функція (44) повинна

мати *min*. Дійсно:

$$\begin{aligned} k_a \rightarrow 0, f(k_a) &\rightarrow \infty; \\ k_a \rightarrow \infty, f(k_a) &\rightarrow \infty; \end{aligned} \quad (46)$$

Отже має існувати скінченне значення (*min*),  $f(k_a)$ , що визначить найменші витрати на спорудження ґрунтового акумулятора заданої продуктивності, й тим самим встановить економічно оптимальне співвідношення між  $k_a$  та  $R_o$  (див. формулу (37)). Застосовуючи стандартну процедуру знаходження екстремуму функції, матимемо:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial k_a} = 1 + k_a^{-0,5} - \beta k_a^{-2}; \\ \frac{\partial^2 f}{\partial k_a^2} = -0,5k_a^{-0,5} + 2\beta k_a^{-3}; \\ 1 + k_{a,m}^{-0,5} - \beta k_{a,m}^{-2} = 0; \\ \left. \frac{\partial^2 f}{\partial k_a^2} \right|_{k_a=k_{a,m}} > 0. \end{cases} \quad (47)$$

Для знаходження  $k_{a,m}$  введемо заміну:  $k_{a,m}^{-0,5} = W$ . Тоді отримаємо рівняння четвертого степеня:

$$1 + W - \beta W^4 = 0 \Leftrightarrow \beta W^4 - W - 1 = 0 \quad (48)$$

Точний розв'язок рівняння (48).

$\beta W^4 - W - 1 = 0$ . Краще це рівняння розв'язати графічно (рис.4.).

$$\bar{f}_1 = W + 1; \quad \bar{f}_2 = \beta \cdot W^4$$

Для кожного  $\beta$  є точка перетину  $\bar{f}_1, \bar{f}_2$ , що й визначає корінь рівняння (48), який позначимо  $W_o$ . Звідси:

$$k_{a,m}^{-0,5} = W_o \Rightarrow W_o^{-2} = \frac{1}{W_o^2} \quad (49)$$

Якщо , тоді можна користуватись спрощеною [8]:

$$W = \beta^{-0,25} \Rightarrow k_{a,m} = W^{-2} = \beta^{1/2} = \sqrt{\beta} \quad (50)$$

Точний розв'язок рівняння можна отримати, використовуючи [9].

$$\beta W^4 - W - 1 = 0 \Rightarrow W^4 - \frac{1}{\beta} W - \frac{1}{\beta} = 0 \quad (51)$$

Кубічна резольвента рівняння (51) має вид: а)спочатку знаходимо приведене рівняння

$$\begin{aligned} (y^*)^4 - \bar{q}y^* - \bar{r} &= 0; \quad y^* \equiv W; \\ \bar{q} &= -\frac{1}{\beta}; \quad \bar{r} = -\frac{1}{\beta}; \end{aligned} \quad (52)$$

Потім власне кубічну резольвенту (51)

$$(\bar{z})^3 - 4\bar{r} \cdot \bar{z} - \bar{q}^2 \Rightarrow (\bar{z})^3 + \frac{4}{\beta} \bar{z} - \frac{1}{\beta^2} = 0. \quad (53)$$

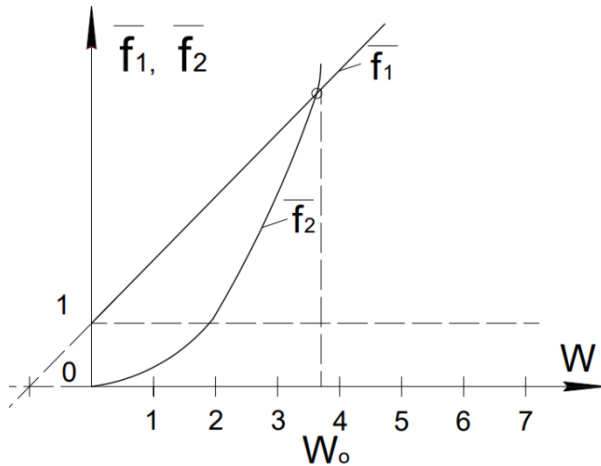


Рис.4. Графічний розв'язок рівняння  $f_1 = W + 1; f_2 = \beta \cdot W^4$

Рівняння (53) співпадає з приведеним (для вже кубічного рівняння):

$$\begin{aligned} (\bar{z})^3 + p^* \cdot \bar{z} + q^* &= 0, \\ p^* &= \frac{4}{\beta}, \quad q^* = -\frac{1}{\beta^2}. \end{aligned} \quad (54)$$

Знайдемо дискримінант  $D$  (54) рівняння:

$$\begin{aligned} D &= \left(\frac{p^*}{3}\right)^2 + \left(\frac{q^*}{3}\right)^2 = \left(\frac{4}{3\beta}\right)^2 + \frac{1}{4\beta^4} = \\ &= \frac{64}{27\beta^3} + \frac{1}{4\beta^4} > 0 \end{aligned} \quad (55)$$

Корені рівняння (54) знаходимо по формулі Кардано:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{z}_2 &= -\frac{(u+v)}{2} + \frac{(u-v)}{2} \cdot i \cdot \sqrt{3}; \\ i^2 &= -1; \\ \bar{z}_3 &= -\frac{(u+v)}{2} - \frac{(u-v)}{2} \cdot i \cdot \sqrt{3}; \\ \bar{z}_1 &= u+v; \\ u &= \sqrt[3]{-\frac{q^*}{2} + \sqrt{D}}; \\ v &= \sqrt[3]{-\frac{q^*}{2} - \sqrt{D}} \end{aligned} \right. \quad (56)$$

Якщо згадати (54), тоді для  $u$  та  $v$  маємо:

$$\begin{aligned} u &= \sqrt[3]{\frac{1}{2\beta^2} + \left\{\frac{64}{27\beta^3} + \frac{1}{4\beta^4}\right\}^{\frac{1}{2}}}; \\ v &= \sqrt[3]{\frac{1}{2\beta^2} - \left\{\frac{64}{27\beta^3} + \frac{1}{4\beta^4}\right\}^{\frac{1}{2}}}; \end{aligned} \quad (57)$$

Зрозуміло, що  $u > v$ .

У якості розв'язку рівнянь (51), (52) візьмемо один з коренів:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\bar{z}_1} + \sqrt{\bar{z}_2} + \sqrt{\bar{z}_3} \right\}; \\ W_2 &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\bar{z}_1} - \sqrt{\bar{z}_2} - \sqrt{\bar{z}_3} \right\} \cdot \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (58)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sqrt{\bar{z}_2} &= \sqrt{\text{Re}\bar{z}_2 + i \cdot \text{Im}\bar{z}_2} = \\ &= \sqrt{|\bar{z}_2| \cdot \exp\{i\varphi\}} = \\ &= |\bar{z}_2|^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left\{i \frac{\varphi}{2}\right\}; \\ \varphi &= \arctg\left\{\frac{\text{Im}\bar{z}_2}{\text{Re}\bar{z}_2}\right\}; \end{aligned} \right. \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\bar{z}_3} &= \sqrt{\text{Re}\bar{z}_2 - i \cdot \text{Im}\bar{z}_2} = \\ &= \sqrt{|\bar{z}_2| \cdot \exp\{-i\varphi\}} = \\ &= |\bar{z}_2|^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left\{-i \frac{\varphi}{2}\right\}; \end{aligned} \quad (60)$$

$$W_1 = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\bar{z}_1} + 2 \cdot |\bar{z}_2|^{\frac{1}{2}} \cdot \cos\left\{\frac{\varphi}{2}\right\} \right\}; \quad (61)$$

$$W_1 = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\bar{z}_1} - 2 \cdot |\bar{z}_2|^{\frac{1}{2}} \cdot \cos\left\{\frac{\varphi}{2}\right\} \right\}$$

Найбільшого значення набуває корінь  $W = \frac{1}{\sqrt{k_{a,\min}}}$ , тому ним і обмежимося у якості розв'язку рівнянь (51), (52).

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\bar{z}_1} + 2 \cdot |\bar{z}_2|^{\frac{1}{2}} \cdot \cos\left\{\frac{\varphi}{2}\right\} \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{u+v} + 2 \cdot |\bar{z}_2|^{\frac{1}{2}} \cdot \cos\left\{\frac{\varphi}{2}\right\} \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\sqrt{u+v} + \\ &+ 2 \cos\left\{\frac{\varphi}{2}\right\} \sqrt{\frac{(u+v)^2}{4} + \frac{(u-v)^2 3}{4}} \end{aligned} \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\sqrt{u+v} + \\ &+ 2 \sqrt{\frac{(u+v)^2}{4} + \frac{(u-v)^2 3}{4}} \times \\ &\times \cos\left\{\frac{1}{2} \arctg\left\{\frac{(u-v) \cdot \sqrt{3}}{(u+v)}\right\}\right\} \end{aligned} \right\}. \end{aligned} \quad (62)$$

Інакше можна записати так корінь рівняння (51):  $(k_{a,\min})^{-0,5} = W \Rightarrow k_{a,\min} = W^{-2}$ , де:

$$W = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\sqrt{u+v} + \\ &+ 2 \sqrt{\frac{(u+v)^2}{4} + \frac{(u-v)^2 3}{4}} \times \\ &\times \cos\left[\frac{1}{2} \arctg\left\{\frac{(u-v) \cdot \sqrt{3}}{(u+v)}\right\}\right] \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

де  $u$  та  $v$  визначаються зі співвідношень (54)-(56).

Можна записати й так:

$$k_{a,min} = 4 \left\{ \begin{aligned} & \sqrt{u+v} + \\ & + 2 \sqrt{\frac{(u+v)^2}{4} + \frac{(u-v)^2 3}{4}} \times \\ & \times \cos \left[ \frac{1}{2} \arctg \left[ \frac{(u-v) \cdot \sqrt{3}}{(u+v)} \right] \right] \end{aligned} \right\}^{-2} \quad (64)$$

де  $(u, v)$  знаходимо зі співвідношень (57);  $k_a$  - це число ефективно працюючих теплообмінників,  $\beta = \tilde{\alpha}_1 \cdot b^2$ .

$$\begin{aligned} \frac{C_T}{C_{\delta y}} &= 0,96\pi \cdot \frac{p}{\sigma} \cdot \frac{N^2}{(2\pi z \cdot q_o)^2} \cdot \frac{C_T}{C_{\delta y}} = \\ &= \frac{0,96\pi}{4\pi^2} \cdot \frac{p}{\sigma} \cdot \frac{N^2}{Z^2 q_o^2} \cdot \frac{C_T}{C_{\delta y}} = \\ &= \frac{0,24}{\pi} \cdot \frac{p}{\sigma} \cdot \frac{N^2}{Z^2 q_o^2} \cdot \frac{C_T}{C_{\delta y}}. \end{aligned} \quad (65)$$

Остаточно,

$$\beta = \frac{0,24}{\pi} \cdot \frac{p}{\sigma} \cdot \frac{N^2}{Z^2 q_o^2} \cdot \frac{C_T}{C_{\delta y}} \quad (66)$$

Оптимальне (у економічному сенсі) співвідношення між  $k_a$  та  $R_o$  (радіусом основної області теплообмінника):

$$k_{a,min} \cdot R_o = \frac{N}{2\pi z \cdot q_o} \quad (67)$$

де  $N$  - потужність акумулювання,  $q_o$  - щільність теплового потоку на зовнішній поверхні теплообмінника.

Розрахунок конкретного прикладу. Маємо наступні вихідні дані. Нехай у літній період ( $\tau_a = 180$  діб  $= 1,555 \cdot 10^7$  с) необхідно акумулювати надлишкову теплоту когенераційної станції з тепловою потужністю  $N = 1$  МВт [7] за максимально досяжної температури ґрунтового акумулятора  $T_{o,max} = 65^\circ\text{C}$  й щільності теплового потоку на стінці ґрунтових теплообмінників  $q_o = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Теплофізичні характеристики ґрунту наступні:  $C_m = 1,15 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{K})}$ ,

$T_m = 8^\circ\text{C} = 281^\circ\text{K}$ ,  $\rho_m = 1,84 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  
 $\lambda_m = 1,42 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{K})}$ , Підрахунки за формулами (другими) (1), (4), (45) й формулам (15), (37) дають значення  $\tilde{E}_a = 1,289 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ ,  $R_o = 15,8$  м,  $Z = 25,3$  м,  $X = Y = 50,6$  м,  $b = 69,93$  м, (акумулятор з теплоізоляційним щитом).

У проекті застосовуються труби марки UPOTEN PE80 SDR11PN10. Аналіз даних прейскуранту на ці труби дозволяє обчислити, що, незалежно від значення діаметру труб,  $\frac{p}{\sigma} = 0,184$ ,  $C_T = 3,7 \cdot 10^3$  €/м. Опитування бурових організацій призвело до результату  $C_{\delta y} = 25$  €/м. Таким чином, згідно першої формули (45) параметр  $\beta = 0,402 \cdot 10^6$ .

Розв'язок рівняння (48), який задовольняє цілому значенню числа свердловин  $m$  на лінійному розмірі  $X$ , дає:  $m = 26$ ,  $k_a = 625$ ,  $k = 676$ ,  $L = 2,0$  м.

Тоді згідно (37),  $R_o = 0,110$  м й діаметр труб, які використовуються для виготовлення 12-трубною теплообмінника, буде  $d = 44$  мм (перша формула (41)). Підстановкою значень  $k_a$  та  $\beta$  у другу формулу (47) можемо впевнитись у мінімумі функції  $f(k_a)$ .

Тепер неважко підрахувати основні витрати на створення економічно оптимального ґрунтового теплообмінника (формули (39), (40)):

$$C_{\delta} = 427570 \text{ €}, \quad C_{TO} = 388192 \text{ €}, \quad C = 815762 \text{ €}.$$

**Висновки.** Поданий техніко-економічний аналіз дозволяє визначити розміри ґрунтового акумулятора з мінімальним відношенням теплових місткостей буферної підобласті й основної області акумулювання, а також встановити зв'язок між числом ґрунтових теплообмінників та їх розмірами, що забезпечує мінімальні витрати на створення акумулятора.

## Література.

1. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г. Проблемы ґрунтового акумултрования теплоты и методы их решения. Промышленная теплотехника. Т.25, №3. С.42-50.
2. Накорчевский А.И.. Динамика ґрунтового аккумуляирования теплоты и выбор рациональных решений. Инженерно-физический журнал. 2004. Т.77, №4. С.10-19.
3. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г. Технологические показатели различных схем ґрунтового аккумуляирования теплоты. Теплоэнергетика. 2006. №3. С.29-35.
4. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г. Некоторые аспекты использования теплоты солнечной радиации для коммунального теплоснабжения. Известия РАН. Энергетика. 2007. №1. С.86-95.
5. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Оптимальная конструкция ґрунтовых теплообменников. Промышленная теплотехника. 2005. Т.27, №6. С.27-31.
6. Ґрунтовий теплообмінник. Патент на винахід №78611. Україна.
7. Долинский А.А., Накорчевский А.И. Основные положения проекта «Когенерация - аккумуляирование –



тепловые насосы». Промышленная теплотехника.2006. Т.28, №4. С.72-79.

8. Накорчевский А.И. Техничко-экономический анализ грунтовых аккумуляторов теплоты. Промышленная теплотехника. 2007. Т.29, №6. С.61-66.

9. Бронштейн И.Н., Семендеев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.:Наука, 1986. 544с.

#### References

1. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I., Belyayeva T.G. Problemy gruntovogo akumulirovaniya teploty i metody ikh resheniya. Promyshlennaya teplotekhnika. T.25, №3. S.42-50.

2. Nakorchevskiy A.I.. Dinamika gruntovogo akumulirovaniya teploty i vybor ratsional'nykh resheniy. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 2004. T.77, №4. S.10-19.

3. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I., Belyayeva T.G. Tekhnologicheskiye pokazateli razlichnykh skhem gruntovogo akumulirovaniya teploty. Teploenergetika. 2006. №3. S.29-35.

4. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I., Belyayeva T.G. Nekotoryye aspekty ispol'zovaniya teploty solnechnoy radiatsii dlya komunal'nogo teplosnabzheniya. Izvestiya RAN. Energetika.2007. №1. S.86-95.

5. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I. Optimal'naya konstruktsiya gruntovykh teploobmennikov. Promyshlennaya teplotekhnika.2005. T.27, №6. S.27-31.

6. Gruntoviy teploobmennik. Patent na vinakhid №78611. Ukraїna.

7. Dolinskiy A.A., Nakorchevskiy A.I. Osnovnyye polozheniya proyekta «Kogeneratsiya - akumulirovaniye – teplovyye nasosy». Promyshlennaya teplotekhnika.2006. Т.28, №4. S.72-79.

8. Nakorchevskiy A.I. Tekhniko-ekonomicheskii analiz gruntovykh akumulirovaniya teploty. Promyshlennaya teplotekhnika. 2007. Т.29, №6. S.61-66.

9. Bronshteyn I.N., Semendeyev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov. M.:Nauka, 1986. 544s.

UDC 662.995+536.242

## Improvement of the methods of structural-parametric optimization in the analysis of ground heat accumulators

Y.Chovniuk<sup>1</sup>, A. Moskvitina<sup>2</sup>, I. Peftieva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [yhovnyuk@ukr.net](mailto:yhovnyuk@ukr.net), ORCID: 0000-0002-0608-0203

<sup>2</sup> PhD, Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [moskvitina.as@knuba.edu.ua](mailto:moskvitina.as@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0003-3352-0646

<sup>3</sup>Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [piefteva.io@knuba.edu.ua](mailto:piefteva.io@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0002-8858-9010

*Abstract. Accumulators of high thermal capacity are organized in a natural soil mass ordered by a set ("bush") of vertical/horizontal heat exchangers, which are placed either in boreholes or inside cylindrical cavities of a concrete mass in pipes. As a result of accumulation, a main region of accumulated heat is created, which is limited by the outer contour of the "bush", of a certain volume and with a certain temperature, as well as a buffer sub-region of a certain volume, which touches the main one and is the result of thermal interaction of the volume of the main region with the surrounding soil mass, which has constant temperature. The smallest dimensions of the buffer subregion will be in the case of a uniform temperature distribution over the main volume. This is achieved by organizing the same heat load that falls on each heat exchanger, the same potential of the intermediate heat carrier and a small difference in its temperatures, respectively, at the inlet and outlet of each heat exchanger, and a number of other requirements. The dimensions of the buffer subregion can be reduced by creating an upper heat shield. This will lead to a reduction in the dimensions of the entire structure and there will be no need for thermal insulation of pipelines that supply and discharge the coolant in the middle of the heat accumulator. In this case, the dimensions of the structure must be optimal, i.e. meet a certain criterion, in which the ratio of the volume of the buffer subregion to the volume of the entire heat accumulator is minimal. An improved method of structural-parametric optimization of ground heat accumulators in the process of analyzing their functioning is presented. The optimal ratios of the dimensions of these accumulators with an upper heat-insulating shield (or without it) and a developed technique are determined that allow finding the number of heat exchangers, their parameter and the distance between them to ensure minimal costs for building an accumulator.*

*Key words: ground heat accumulators; heat-insulating shield; optimization of the design of the heat accumulator; seasonal accumulation of heat.*

Наукове видання

# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 42

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 27.06.2022. Формат 60×84 1/8  
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Умов. друк. арк. 5,58. обл. вид. арк.

