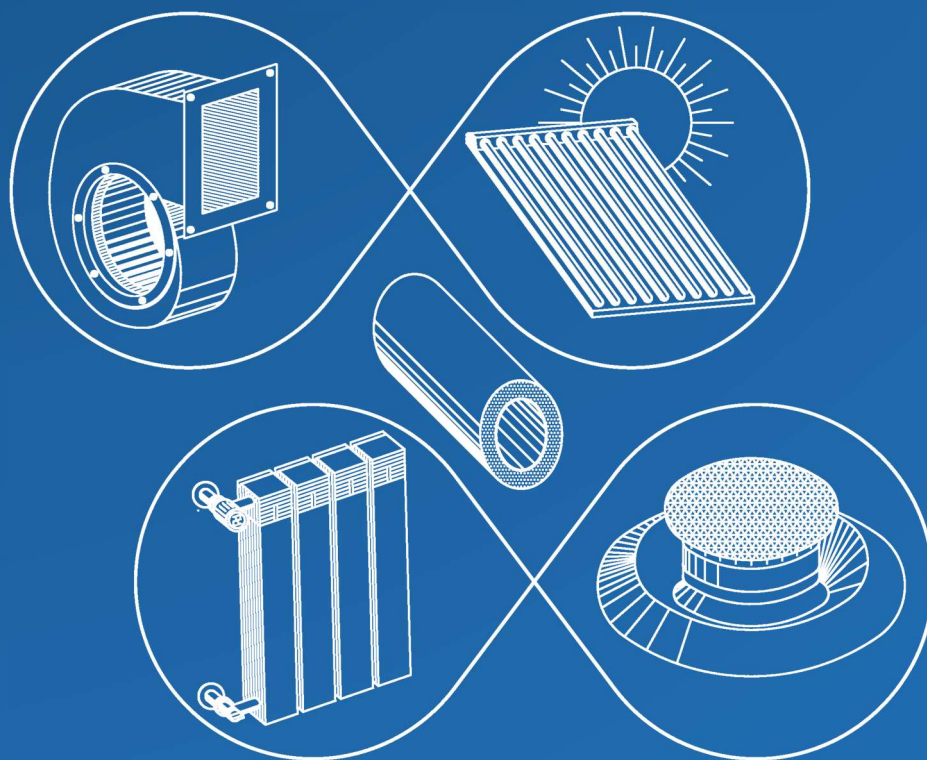


# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2023

Випуск 45



КИЇВ 2023

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 45

Kyiv 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

# **ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*заснований у 2001 році*

ВИПУСК 45

Київ 2023

УДК 697  
В29

ISSN 2409-2606

**Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:** науково-технічний збірник. – Вип. 45 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2023. – 52 с.

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

**Редакційна колегія:** докт. техн. наук, професор В. О. Мілейковський (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); ас. О.А. Дудніков (відповідальний секретар); докт. екон. наук, доцент К. М. Предун; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професорка Т. М. Ткаченко; докт. техн. наук, професор Г. В. Жук; докт. техн. наук, професор В. А. Кравець; докт. техн. наук, професор Г. Гавардашвілі (Грузія); докт. техн. наук, професор З. 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 14 квітня 2023 р., протокол № 7.

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

тел. +380(44)245-48-33

© Київський національний університет будівництва і архітектури

## З М І С Т

Вадим Корбут, Тетяна Ткаченко, Віктор Мілейковський, Володимир Вахула, Вікторія Коновалюк

*Оцінювання формування комфортних теплових умов і чистоти повітря зональними місцево-центральною системою кондиціонування повітря і санаційним фітодизайном. .... 5*

Д. В. Гузик, О. В. Череднікова, Д.О. Дубчак, Б. М. Нестеренко, А.С.Передерій, О.Г. Сімон

*Експериментальні дослідження процесів сушіння бананів..... 21*

В. Г. Наливайко, В. А. Коновалюк

*Розробка багатофункціональної установки дрібнодисперсного зрошення..... 29*

Ілля Девтеров, Петро Зінич

*Розвиток енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні ..... 36*

О. Г. Погосов, Н. В. Чепурна, П. О. Пасічник, Є. О. Кулінко, А. А. Дорошенко

*Сучасні системи тепло- та паропостачання промислових підприємств при застосуванні глибокої утилізації енергетичного потенціалу технологічної пари ..... 42*

C O N T E N T S

Vadym Korbut, Tetiana Tkachenko, Viktor Mileikovskiy, Volodymyr Vakhula,  
Viktoriiia Konovaliuk

*Analytical studies of the functioning of ventilation with local cooling in public  
buildings* ..... 5

Dmitriy Guzyk, Oleksandra Cherednikova, Dmytro Dubchak, Bohdan  
Nesterenko, Alina Perederii, Oleksiy Simon

*Thermal modernization and improvement of ingeneering systems of campus F of  
National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"* ..... 21

V. Nalyvaiko, V. Konovaliuk

*Development of a multifunctional installation of fine dispersed irrigation*..... 29

Illja Devterov, Petro Zynych

*Development of energy supply civil engineering system in Ukraine* ..... 36

O. Pohosov, N. Chepurna, P. Pasichnyk, E. Kulinko, A. Doroshenko

*Modern heat and steam supply systems of industrial enterprises using deep  
utilization of the technological steam energy potential* ..... 42

УДК 697.9+72.012.8+614.44

## Оцінювання формування комфортних теплових умов і чистоти повітря зональними місцево-центральною системою кондиціонування повітря і санаційним фітодизайном

Вадим Корбут<sup>1</sup>, Тетяна Ткаченко<sup>2</sup>, Віктор Мілейковський<sup>3</sup>, Володимир Вахула<sup>4</sup>, Вікторія Коновалюк<sup>5</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [predsedatel@emw.kiev.ua](mailto:predsedatel@emw.kiev.ua), ORCID: 0000-0002-4560-5463

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [mileikovskiy@gmail.com](mailto:mileikovskiy@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>4</sup>ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [v.vahula@gmail.com](mailto:v.vahula@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7973-6421

<sup>5</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [viktoria.konovalyuk@gmail.com](mailto:viktoria.konovalyuk@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5115-7188

*Анотація. На сьогодні створення оптимальних мікрокліматичних умов обов'язкове для переважної більшості приміщень громадських будівель. Основною проблемою в теплий період року є мінімізація енергоспоживання. Традиційні системи з рециркуляцією вимагають повернення відпрацьованого повітря до вентиляційної установки, що вочевидь супроводжується додатковими витратами енергії на його переміщення. Цього недоліку нема в системах вентиляції з охолодженням, які складаються з системи вентиляції, що подає мінімальну витрату зовнішнього повітря, та місцевих довідників, які забирають повітря з верхньої або середньої зони, охолоджують його та подають до приміщення. У роботі розглянуто принципи аналітичного опису процесів у приміщенні при сумісній роботі вентиляції з місцевим охолодженням. Створено алгоритм розрахунку та симулятор на його базі. В основу аналітичного опису покладено спрощення, що припливне повітря та повітря після довідників спочатку змішуються, а потім суміш бере участь в асиміляції тепловологонадлишків у приміщенні. Проаналізовано вплив різних факторів на продуктивність та холодопродуктивність довідників. Показано, що для максимальної енергоефективності з мінімальними затратами необхідно виконувати розрахунок, а не користуватися укрупненими показниками. Показано, що продуктивність довідників може перевищувати витрату зовнішнього повітря. Довідники повертають відпрацьоване повітря до робочої зони, що призводить до підвищення вмісту вуглекислого газу в ній та можливості повернення хвороботворних мікроорганізмів і вірусів до неї. Показано, як обидві проблеми вирішує біотехнологічний захід – санаційний фітодизайн. Наведено рекомендований асортимент рослин.*

*Ключові слова: вентиляція з охолодженням, аналітичний опис, оброблення повітря, асиміляція тепловологонадлишків, санація, фітодизайн.*

**Вступ.** З прийняттям ДБН В.2.5-67:2013 створення оптимальних мікрокліматичних умов стало обов'язковим для переважної більшості приміщень громадських будівель. Основною проблемою, особливо в теплий період року, є мінімізація енергоспоживання.

Традиційні системи з рециркуляцією вимагають повернення відпрацьованого повітря до вентиляційної установки, що, вочевидь, супроводжується додатковими витратами енергії на його переміщення. Також значно збільшуються габарити як вентиляційної установки, так і повітроводів, повітророзподільного й витяжного обладнання тощо. Тому в Україні значно інтенсифікувалося впровадження окремих систем вентиляції з місцевим охолодженням спеціальними пристроями – довідниками. Ці системи прийнято класифікувати як зональні місцево-центральною системою кондиціонування повітря.

У невеликих приміщеннях як довідники часто застосовують спліт-системи. У великих приміщеннях для рівномірного охолодження перевагу віддають касетним кондиціонерам, рівномірно розміщеним стелею. Рекомендації виробників часто обмежені укрупненими показниками, зокрема рекомендованою площею на один пристрій. Цього явно недостатньо для правильного підбору та розрахунку, а головне, виявлення основних недоліків таких систем та методів їхнього пом'якшення. Тому необхідний якісний аналітичний опис сумісної дії систем вентиляції та охолодження.

**Актуальність дослідження.** Підвищення енергоефективності формування мікроклімату набуло особливої актуальності під час післявоєнної розбудови, адже енергонезалежність від росії є ключовою запорукою тривалого миру.

**Останні дослідження та публікації.** Місцеве охолодження привертає увагу дослідників різних країн через його енергетичну ефективність. Зокрема, японські автори запропонували натягувати під стелею з кондиціонерами тканину, що пропускає повітря і за рахунок охолодження працює як радіаційний охолоджувач [2].

У роботі [3] проаналізовано роботу різних видів місцевого охолодження в житловому будинку з практично нульовим енергоспоживанням – спліт-система, мультиспліт-система, касетні кондиціонери та радіаційне охолодження. Як висновки зазначено необхідність утилізації теплоти витяжного повітря, показано перевагу спліт-систем, а також зазначено високу ефективність комбінування конвективної та радіаційної складової охолодження.

У роботі [4] розроблено ефективний контролер для стельового кондиціонера. Він дозволяє досягти високої енергоефективності регулювання.

Значну увагу дослідники приділяють ефективності повітророзподілення [5-7]. Адже спосіб подачі повітря суттєво впливає на енергоефективність формування мікроклімату

Разом з зазначеним вище, аналітичному опису сумісної роботи вентиляції та охолодження приділено недостатню увагу. Не розглянуто недоліки функціонування таких систем. Метод розрахунку розглянуто лише в роботі [8]. Прийняті спрощення призвели до виходу точки робочої зони за межі побудови на I-d діаграми. Тому постає задача розроблення методу аналітичного опису подібних рішень.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є розроблення підходу до аналітичного оцінювання процесів при зональних місцево-центральних системах кондиціонування повітря з подальшим аналізом особливостей функціонування таких систем.

**Визначення вихідних даних.** Система вентиляції приймається прямотечійною (рис. 1) і подає лише зовнішнє повітря без охолодження. Незалежно від цієї системи в приміщенні передбачаються повітроохолоджувачі – довідники. Вони забирають повітря у верхній або середній зоні, охолоджують його і подають до приміщення з верхньої зони струминами вниз, вертикально або під кутом.

Змішування охолодженого повітря з повітрям приміщення – це дуже складний процес, що складається з підмішування (ежекції) повітря верхньої зони до струмин охолодженого повітря та змішування отриманої суміші з повітрям робочої зони при розпаді в ній струмин. Останній

процес відбувається одночасно з асиміляцією тепловологонадлишків. Повний розрахунок таких процесів є складною задачею. На сьогодні це можна зробити лише методами обчислювальної гідродинаміки.

Особливістю систем є конденсація вологи в довідниках, яка або відводиться до водовідведення або збирається для потреб водопостачання. Тому вологовміст витяжного повітря заздалегідь невідомий. При визначенні холодопродуктивності довідників слід використовувати в розрахунках величину повної теплоти  $Q_{hf}$ , Вт.

За [1] у громадських будівлях необхідна утилізація теплоти витяжного повітря. Температурний коефіцієнт ефективності теплоутилізатора для прямотечійних систем вентиляції без тепловологісного оброблення повітря в теплий період року має вигляд

$$E = (t_{in} - t_{ext}) / (t_{\ell} - t_{ext}), \quad (1)$$

де  $t$  – температура повітря, °C;  $in$  – індекс, що відповідає припливному повітрю;  $ext$  – індекс, що відповідає зовнішньому повітрю,  $\ell$  – індекс, що відповідає витяжному повітрю. Звідси температуру припливного повітря можна визначити при розрахунку за градієнтом температури за формулою

$$t_{in} = t_{ext} + E (t_{\ell} - t_{ext}). \quad (2)$$

За відомими температурою  $t_{in}$ , °C, та вологовмістом  $d_{ext}$ , г/кг, визначаємо два інші параметри за табл. Параметри повітря після довідника залежать від температури холодоносія (для води 12 °C) або холодоагенту в ньому  $t_{wo}$ , °C, за формулою

$$t_f = t_{wo} + 1...3, \quad (3)$$

де індекс  $f$  відповідає повітрю після довідника, а значення температурного перепаду з діапазону вибирається залежно від конструктивних особливостей теплообмінника.

Відносна вологість повітря приймається 90...95 %. Тому ентальпію або вологовміст повітря після довідника можна визначити аналітично за табл. Параметри зовнішнього повітря визначають за двома відомими параметрами також за табл. Таким чином маємо всі необхідні вихідні дані.



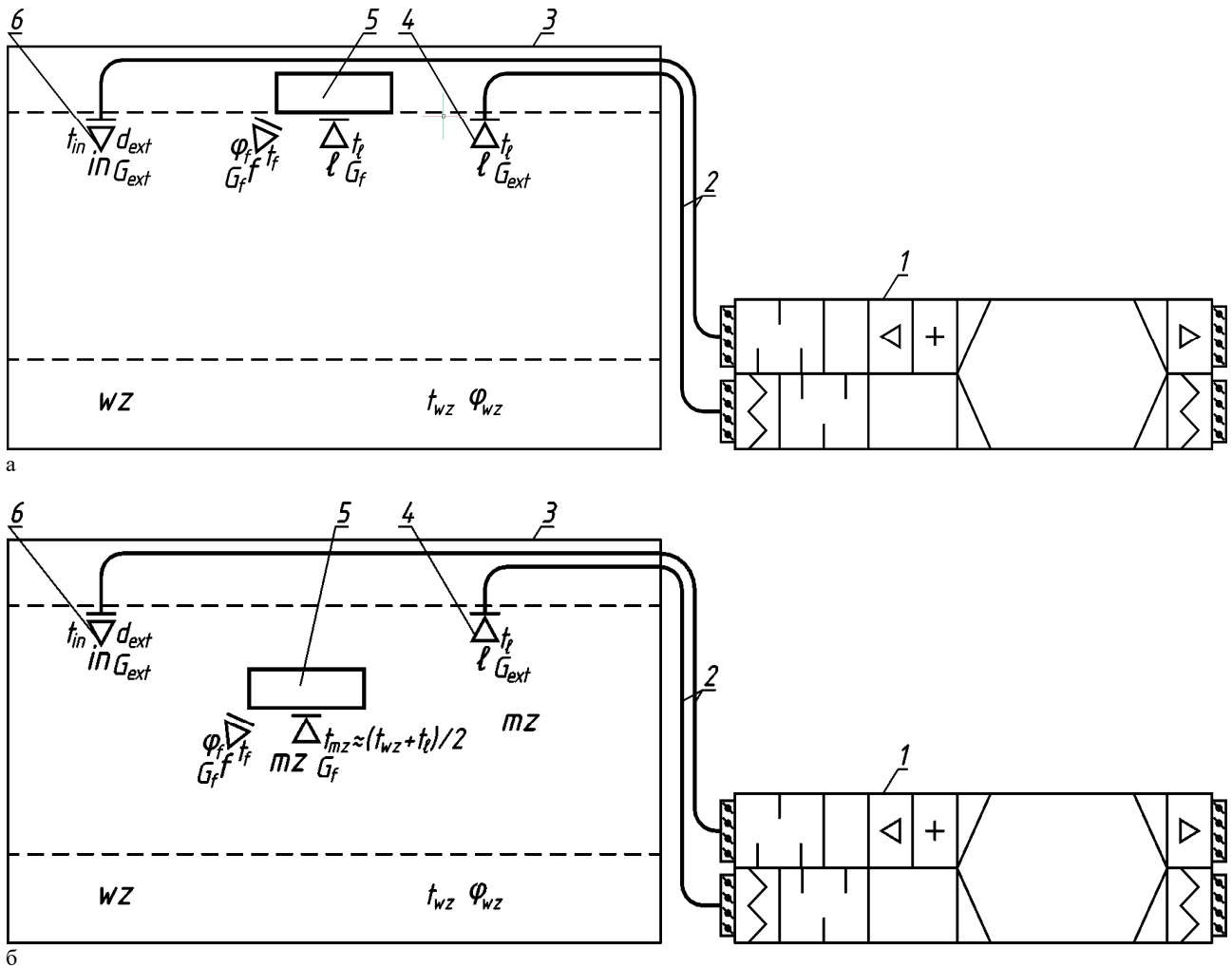


Рис. 1. Схема зональної місцево-центральної системи кондиціонування повітря:

- 1 – припливно-витяжна прямотечійна вентиляційна установка з теплоутилізатором, що подає мінімально допустиму витрату зовнішнього повітря;
- 2 – мережа повітроводів загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції;
- 3 – приміщення, яке обслуговується;
- 4 – витяжний(і) пристрій(ої) загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції
- 5 – повітроохолоджувач-довідник
- 6 – повітророзподільник(и) загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції
- wz – робоча зона; mz – середня зона; l – витяжне повітря (верхня зона).

### Принципи аналітичного опису процесів.

При аналітичному описі повітрообміну з охолодженням приймаємо схему організації повітрообміну за рис. 1 з такими спрощеннями:

- припливне та охоложене повітря спочатку змішується «як є» до суттєвого підмішування повітря верхньої зони, а суміш (індекс міх) має ентальпію та вологовміст, відповідно,

$$I_{mix} = (G_{ext} I_{in} + G_f I_f) / (G_{ext} + G_f), \quad (4)$$

$$d_{mix} = (G_{ext} d_{ext} + G_f d_f) / (G_{ext} + G_f), \quad (5)$$

де  $G_{ext}$  і  $G_f$ , відповідно, масова витрата зовнішнього повітря (повітрообмін) і продуктивність довідника (за повітрям), що може бути замінена об'ємною витратою  $L_{ext}$  і  $L_f$ , приведеною до стандартної густини  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$  за [1];

- суміш припливного й охоложеного повітря асимілює тепловологонадлишки відповідно до кутового коефіцієнта променя процесу

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 3,6 \Delta Q_{hf} / W = (I_l - I_{mix}) / (d_l - d_{mix}) = \\ &= (I_{wz} - I_{mix}) / (d_{wz} - d_{mix}) = (I_l - I_{wz}) / (d_l - d_{wz}), \end{aligned} \quad \text{кДж/Г}, \quad (6)$$

Аналітичне визначення параметрів повітря – температури  $t$ , °C, ентальпії  $I$ , кДж/кг, вологовмісту  $d$ , г/кг та відносної вологості повітря  $\varphi$ , %, для атмосферного тиску  $P_0$ , гПа [9,10]

Параметр	Розрахункові формули, якщо відомо другий параметр:		
	вологовміст $d$ , г/кг	температура $t$ , °C	відносна вологість $\varphi$ , %
Ентальпія $I$ , кДж/кг	$t =$ $= (I - 2,5 d) / (1,8 \cdot 10^{-3} \cdot d + 1,006)$ $\approx (I - 2,53 d) / 1,024$ , °C; $P_{н.п.}$ – примітка 1; $\varphi = (100 \cdot d \cdot P_0) / ((623 + d) \cdot P_{н.п.})$ , %	$d =$ $= (I - 1,006 \cdot t) / (1,8 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,5)$ $\approx (I - 1,024 t) / 2,53$ , г/кг; $P_{н.п.}$ – примітка 1; $\varphi = (100 \cdot d \cdot P_0) / ((623 + d) \cdot P_{н.п.})$ , %	$t$ – примітка 3 $d =$ $= (I - 1,006 \cdot t) / (1,8 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,5) \approx$ $\approx (I - 1,024 t) / 2,53$ , г/кг;
Вологовміст $d$ , г/кг	—	$I = 1,006 t + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} t) d$ , кДж/кг; $P_{н.п.}$ – примітка 1; $\varphi = (100 \cdot d \cdot P_0) / ((623 + d) \cdot P_{н.п.})$ , %	$P_{н.п.} = (100 \cdot d \cdot P_0) / ((623 + d) \cdot \varphi)$ , гПа; $t$ – примітка 2; $I = 1,006 t + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} t) d$ , кДж/кг
Температура $t$ , °C	—	—	$P_{н.п.}$ – примітка 1; $d = 623 \cdot P_{н.п.} \cdot \varphi / (100 \cdot P_0 - P_{н.п.} \cdot \varphi)$ , г/кг; $I = 1,006 \cdot t + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot d$ , кДж/кг

Примітки.

1. Тиск насиченої пари розраховують за “модифікованою” формулою Бака [10] у гПа

$$\begin{cases} P_{н.п.} = EF \cdot 6,1115 \cdot e^{\left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \frac{t}{t+279,82}} \approx 6,144 \cdot e^{\left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \cdot t / (t+279,82)}, & t < 0; \\ P_{н.п.} = EF \cdot 6,1121 \cdot e^{\left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \frac{t}{t+257,14}} \approx 6,144 \cdot e^{\left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \cdot t / (t+257,14)}, & t \geq 0, \end{cases}$$

де EF – поправка [10] на вплив взаємодії молекул повітря (enhancement factor), що є відношенням тиску насиченої пари в повітря до цього тиску в системі “лише пара-рідина”:

$$\begin{cases} EF = 1 + 10^{-4} \cdot (2,2 + P_0 \cdot (0,0383 + 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)) \approx 1,0053 \pm 0,2\%, & t < 0; \\ EF = 1 + 10^{-4} \cdot (7,2 + P_0 \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)) \approx 1,00522 \pm 0,2\%, & t \geq 0. \end{cases}$$

Наближені значення наведено усередненими для більшості країн світу ( $P_0 = 800 \dots 1060$  гПа,  $t = -67 \dots +70$  °C) з мінімальним відносним відхиленням. Для інших регіонів слід розрахувати для обох найменших та обох найбільших за модулем значень тиску і температури в кожному піддіпазоні, а потім взяти середнє значення як відношення подвійного добутку та суми результатів.

2. Розв’язання рівняння тиску насиченої пари (див. примітку 1) дає рівняння температури, °C,

$$\begin{cases} t = 166,85 \cdot \left(23,036 - A - \sqrt{A \cdot (A - 49,42615) + 530,657296}\right), & t < 0; \\ t = 117,25 \cdot \left(18,678 - B - \sqrt{B \cdot (B - 41,742183) + 348,867684}\right), & t \geq 0, \end{cases}$$

$$A = \ln(P_{н.п.} / (6,1115 \cdot EF)) \approx \ln(P_{н.п.} / 6,144); \quad B = \ln(P_{н.п.} / (6,1121 \cdot EF)) \approx \ln(P_{н.п.} / 6,144).$$

3. Щоб знайти температуру повітря за відносною вологістю та ентальпією слід чисельно розв’язати рівняння, отримане з системи трьох рівнянь для визначення параметрів за відомими ентальпією та температурою в табл., а саме

$$\begin{cases} 0 = P_0 (I - 1,006 t) - (I + 0,1154 t + 1557,5) \cdot (\varphi / 100) \times \\ \left\{ 6,1115 \cdot \left(1 + 10^{-4} (2,2 + P_0 \cdot (0,0383 + 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2))\right) \cdot e^{\left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \cdot t / (t+279,82)}, & t < 0; \right. \\ \left. 6,1121 \cdot \left(1 + 10^{-4} (7,2 + P_0 \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2))\right) \cdot e^{\left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \cdot t / (t+257,14)}, & t \geq 0 \right. \end{cases}$$

або наближено

$$0 = P_0 \cdot (I - 1,006 \cdot t) - 6,144 (I + 0,1154 \cdot t + 1557,5) \cdot (\varphi / 100) \cdot e^{\begin{cases} \left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \cdot t / (t+279,82), & t < 0; \\ \left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \cdot t / (t+257,14), & t \geq 0. \end{cases}}$$

де  $\Delta Q_{hf}$  – повні теплонадлишки в приміщення, Вт;  $W$  – вологонадлишки, г/год.

• довідник забирає повітря з верхньої або середньої зони та охолоджує його з можливим

осушенням до параметрів з індексом  $f$ .

Відповідно до цих припущень процеси на  $I-d$  діаграмі відповідатимуть рис. 2. На відміну від кондиціонування повітря другий параметр стану повітря робочої зони  $wz$  заздалегідь невідомий. Відомі лише температура повітря в робочій зоні  $t_{wz}$ , °C, і температура витяжного повітря  $t_\ell$ , °C.

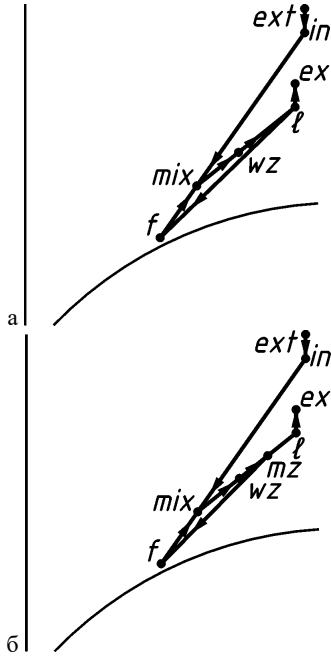


Рис. 2. Спрощена схема процесів оброблення повітря зональними місцево-центральними системами кондиціонування повітря: а – при розміщенні довідників у верхній зоні; б – те ж у середній зоні:

$ext$  – стан зовнішнього повітря;  $in$  – стан припливного повітря;  $f$  – стан повітря після довідника;  $mix$  – стан суміші припливного повітря та повітря після теплоутилізатора;  $wz$  – стан повітря робочої зони;  $mz$  – стан повітря середньої зони;  $\ell$  – стан витяжного повітря;  $ex$  – стан повітря, що викидається назовні:

$ext \rightarrow in$  – процес охолодження припливного повітря в теплоутилізаторі;  $in \rightarrow mix \leftarrow f$  – процес змішування припливного повітря і повітря після теплоутилізатора;  $mix \rightarrow wz \rightarrow \ell$  або  $mix \rightarrow wz \rightarrow mz \rightarrow \ell$  – процес асиміляції тепловологонадлишків у приміщенні;  $\ell \rightarrow ex$  – процес відбору «холоду» витяжного повітря в теплоутилізаторі;  $\ell \rightarrow f$  або  $mz \rightarrow f$  – процес охолодження в довіднику

У даній роботі розглянемо розміщення довідників у верхній зоні. Баланси теплоти та вологи в приміщенні, відповідно,

$$G_{ext} I_{in} + 3,6 \Delta Q_{hf, mn} - G_f (I_\ell - I_f) - G_{ext} I_\ell = 0; \quad (7)$$

$$G_{ext} d_{ext} + W_{mn} - G_f (d_\ell - d_f) - G_{ext} d_\ell = 0. \quad (8)$$

У рівнянні (7) за допомогою системи символічної алгебри Махіма замінюємо ентальпію вологовмістом і температурою за формулою табл. а саме

$$I_{in} = 1,006 \cdot t_{in} + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} t_{in}) d_{ext}, \quad (9)$$

кДж/кг;

$$I_\ell = 1,006 \cdot t_\ell + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} t_\ell) d_\ell, \quad (10)$$

кДж/кг;

$$I_f = 1,006 \cdot t_f + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} t_f) d_f, \quad (11)$$

кДж/кг.

Отриману систему рівнянь розв'язано за допомогою Махіма. Розв'язок

$$G_f = (18000 \cdot \Delta Q_{hf} - (9 \cdot t_\ell + 12500) \cdot W + G_{ext} \cdot (9 \cdot d_{ext} + 5030) \cdot (t_{in} - t_\ell)) \div ((9 \cdot d_f + 5030) \cdot (t_\ell - t_f)), \quad (12)$$

кг/год;

$$d_\ell = (G_{ext} \cdot d_{ext} + G_f \cdot d_f + W) / (G_{ext} + G_f). \quad (13)$$

Якщо  $d_f \leq d_\ell$ , то результати розрахунків є правильними. За відомими температурою і вологовмістом витяжного повітря за табл. знаходимо два інші параметри.

Якщо  $d_f > d_\ell$ , то утворення конденсату не відбуватиметься. Тоді процес охолодження буде спрямовано вертикально вниз, тобто  $d_f = d_\ell$ . Результати розрахунків за формулами (12) і (13) слід визнати помилковими. Рівняння (8) у даному випадку дає просту залежність:

$$d_f = d_\ell = d_{ext} + (W/G_{ext}). \quad (14)$$

За даними табл. за відомою температурою повітря після довідників та витяжного повітря можна визначити два інші параметри обох станів повітря, а далі скористатися рівнянням (8) без заміни ентальпії, розв'язок якого

$$G_f = (G_{ext} (I_{in} - I_\ell) + 3,6 \Delta Q_{hf}) / (I_\ell - I_f). \quad (15)$$

Від'ємний або нульовий результат свідчить про відсутність потреби в охолодженні, що є підставою припинити розрахунок.

Вологовміст повітря робочої зони можна знайти з формули (6) після підставлення залежності (10) і аналогічної залежності для параметрів повітря робочої зони

$$I_{wz} = 1,006 \cdot t_{wz} + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3} t_{wz}) d_{wz}, \quad (16)$$

кДж/кг.

Маємо

$$d_{wz} = \frac{3,6\Delta Q_{hf}d_l - (1,006(t_l - t_{wz}) + (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3}t_l)d_l)W}{3,6\Delta Q_{hf} - (2,5 + 1,8 \cdot 10^{-3}t_{wz})W} \quad (17)$$

У формулі (17) навмисно відсутній кутовий коефіцієнт променя процесу. Це дозволяє отримати правильний результат за умови його нескінченного значення, що відповідає  $W = 0$ , без додаткових перевірок. Цей коефіцієнт для аналітичного опису рахувати слід лише для перевірки нев'язок.

Вологовміст повітря робочої зони має опинитися між вологовмістом суміші та витяжного повітря, тобто  $(d_\ell - d_{wz})(d_{wz} - d_{mix}) \geq 0$ . У протилежному випадку досягти потрібних параметрів робочої зони даною системою неможливо. Але подібна ситуація за результатами розрахунків спостерігається лише за екстремальних умов, наприклад, близький до нуля вологовміст зовнішнього повітря (умови пустелі).

За відомими вологовмістом і температурою повітря робочої зони знаходимо інші два параметри за табл. I залишається визначити параметри повітря суміші. Це можна зробити двома способами:

- пошуком перетину променя процесу та лінії змішування (простіше за графоаналітичним методом на I-d діаграмі, який у даній роботі не розглядається);
- за формулами (4-5) (простіше для аналітичних розрахунків), після чого слід знайти інші параметри за табл. Для перевірки можна розрахувати кутовий коефіцієнт променя процесу за першим рядком формули (6) і порівняти результати.

Визначаємо холодопродуктивність довідників

$$Q_c = G_f(I_\ell - I_f)/3,6, \text{ Вт} \quad (18)$$

Довідники продукують конденсат у кількості

$$W_c = G_f(d_\ell - d_f), \text{ Вт} \quad (19)$$

Також для перевірки та експертного аналізу визначаємо асиміляцію теплоти та вологи вентиляційним повітрям:

$$Q_{hf,a} = G_{ext} \cdot (I_\ell - I_{in})/3,6, \text{ Вт}; \quad (20)$$

$$W_a = G_{ext} \cdot (d_\ell - d_{in}), \text{ г/год} \quad (21)$$

Для перевірки визначаємо повну асиміляцію теплоти та вологи системами вентиляції та охолодження:

$$\Delta Q'_{hf} = Q_c + Q_{hf,a}, \text{ Вт}; \quad (22)$$

$$W' = W_a + W_c, \text{ Вт} \quad (23)$$

Також визначаємо кутовий коефіцієнт променя процесу за формулою (9) за параметрами витяжного повітря та суміші:

$$\varepsilon' = (I_\ell - I_{mix})/(d_\ell - d_{mix}). \quad (24)$$

Формула (27) повторює один з членів формули (9), адже ми скористалися ним лише для запису рівнянь, а не для розрахунків. Тому варто його перевірити.

Під час перевірки визначаємо три нев'язки

$$RD_Q = 100 (\Delta Q'_{hf} - \Delta Q_{hf})/\Delta Q_{hf} \leq 5 \%; \quad (25)$$

$$RD_W = 100 (W' - W)/W \leq 5 \%; \quad (26)$$

$$RD_\varepsilon = 100 (\varepsilon' - \varepsilon)/\varepsilon \leq 5 \%. \quad (27)$$

Насправді, якщо всі виклади правильні, нев'язки виникатиме лише при несумірних значеннях окремих величин (наприклад,  $\varepsilon \rightarrow \infty$ ) через втрату точності при їхньому додаванні або відніманні.

У разі, якщо будь-яка з формул (25-27) дає ділення на нуль, міняємо значення в знаменнику на те ж зі штрихом. Якщо в чисельнику не нуль, то нев'язка буде біля 100 %. Якщо ж обидва результати дають помилку ділення на нуль, значить обидва значення величини дуже близькі до нуля, що дозволяє стверджувати несуттєвість тепло- або вологонадлишків. Тобто розрахунок за цим параметром правильний.

**Експертний аналіз результатів.** Результати розрахунку перед остаточним прийняттям системи вентиляції з охолодженням слід детально проаналізувати. Формула (20) і (21) у більшості випадків на території України дають від'ємне значення асиміляції теплоти та/або вологи. При цьому система вентиляції замість асиміляції відповідної шкідливості її вносить. Це є особливістю розглянутих систем, коли довідники працюють незалежно від системи вентиляції. При цьому варто розглянути варіанти оброблення припливного повітря або в центральному кондиціонері або подавання його безпосередньо до кондиціонера-довідника.

Якщо відносна вологість повітря в робочій або верхній зоні виходить за допустимі межі (понад 70 %), створюються умови для інтенсивного розвитку грибків, що виділяють найсильніші канцерогени – мікотоксини. Прийдеться приймати кондиціонування повітря з підтриманням заздалегідь заданих двох параметрів повітря робочої зони.

**Результати розрахунків.** За формулами (2-27) створено програму в системі електронних таблиць з відкритим кодом LibreOffice Calc. Алгоритм аналітичного розрахунку відповідає рис. 3-7.

Для прикладу розглянемо залу на 258 людей площею 258 м<sup>2</sup> заввишки 5,7 м з такими базовими значеннями параметрів. Теплонадлишки становлять  $Q_{hf} = 53200$  Вт, вологонадлишки  $W = 49510$  г/год, значення повітрообміну  $G_{ext} = 12960$  кг/год. Температура зовнішнього повітря  $t_{ext} = 32^\circ\text{C}$ , а відносна вологість  $\phi_{ext} = 50\%$ . За [11] температуру повітря робочої зони прийнято  $t_{wz} = 26^\circ\text{C}$ . Температура витяжного повітря за градієнтом температури  $t_\ell = t_{wz} + 1,9^\circ\text{C}$ . Відносну вологість повітря після довідників прийнято 95 %, а температуру  $t_f = 13^\circ\text{C}$ .

Розглянемо, як впливають фактори на параметри роботи системи. Зафіксуємо ентальпію зовнішнього повітря на рівні 60 кДж/кг і змінюватимемо вологовміст. Графік на рис. 8 показує, що поки не починається конденсація, холодопродуктивність лінійно спадає зі зростанням частки прихованої теплоти. У момент появи конденсату графік холодопродуктивності має злам, плавно зростає до максимуму, а потім спадає. Продуктивність довідників за повітрям лінійно спадає.

Зафіксуємо ентальпію на меншому рівні – 40 кДж/кг. Поведінка кривих (рис. 9) буде такою ж за винятком меншої кривини лінії холодопродуктивності при конденсації. Така складна поведінка кривої показує важливість виконання розрахунку, а не використання укрупнених показників.

Зафіксуємо не ентальпію, а температуру зовнішнього повітря на рівні 32 °С. При цьому продуктивність довідників залишається практично незмінною. До появи конденсації холодопродуктивність теж практично незмінна, адже теплоємність водяної пари в повітрі відіграє незначну роль, а вологообмін відсутній. Після появи конденсації холодопродуктивність практично лінійно зростає.

Виникає питання, чи можна спростити розрахунок продуктивності. Для цього приймемо температуру повітря робочої зони 22 °С, а зовнішнього повітря 28 °С (з тим же перепадом). При нульовому вологовмісті за рис. 10 продуктивність  $G_f = 5564$  кг/год, а при зазначених температурах –  $G_f = 7638$  кг/год, що на 37,3 % менше. Тепер зафіксуємо не перепад, а температуру зовнішнього повітря 32 °С, а змінимо температуру повітря робочої зони до 22 °С. Отримаємо ще більшу продуктивність –  $G_f = 9121$  кг/год. Аналогічно підтверджується суттєва залежність продуктивності від тепло- і вологонадлишків при фіксованому та змінному кутовому коефіцієнті променя процесу.

Таким чином, для досягнення найвищої енергоефективності з мінімальними затратами приймати кондиціонери-довідники слід за розрахунком, а не за укрупненими показниками (за площею, теплонадходженнями тощо). Алгоритм на рис. 3-7 достатньо просто реалізується в системах електронних таблиць або комп'ютерної алгебри.

**Проблеми функціонування зональних місцево-центрально-систем кондиціонування повітря.** На рис. 8 привертає увагу значна продуктивність довідників, що може перевищити витрату зовнішнього повітря. За результатами розрахунку прикладу маємо  $G_f = 5547$  кг/год, що відповідає 42,8 % витрати зовнішнього повітря. З урахуванням ежекції повітря верхньої зони струминами система в цьому випадку примусово повертає значний об'єм відпрацьованого повітря до робочої зони – біля половини витрати зовнішнього повітря. Це призводить до:

- підвищення в робочій зоні концентрації вуглекислого газу;
- можливості повернення пилових та аерозольних частинок з хвороботворними мікроорганізмами й вірусами.

Перше не має принципового значення, якщо розрахунок повітрообміну ведеться на забезпечення гранично допустимої концентрації  $q_{MPC}$  у витяжному повітрі, що дісталось у спадок від радянських часів.

На сьогодні більш уживаним підходом є коефіцієнт повітрообміну [12] за концентрацією або мольною часткою вуглекислого газу  $q$  (можна послугуватися різними розмірностями):

$$K_L^{CO_2} = (q_\ell - q_{in}) / (q_{wz} - q_{in}). \quad (28)$$

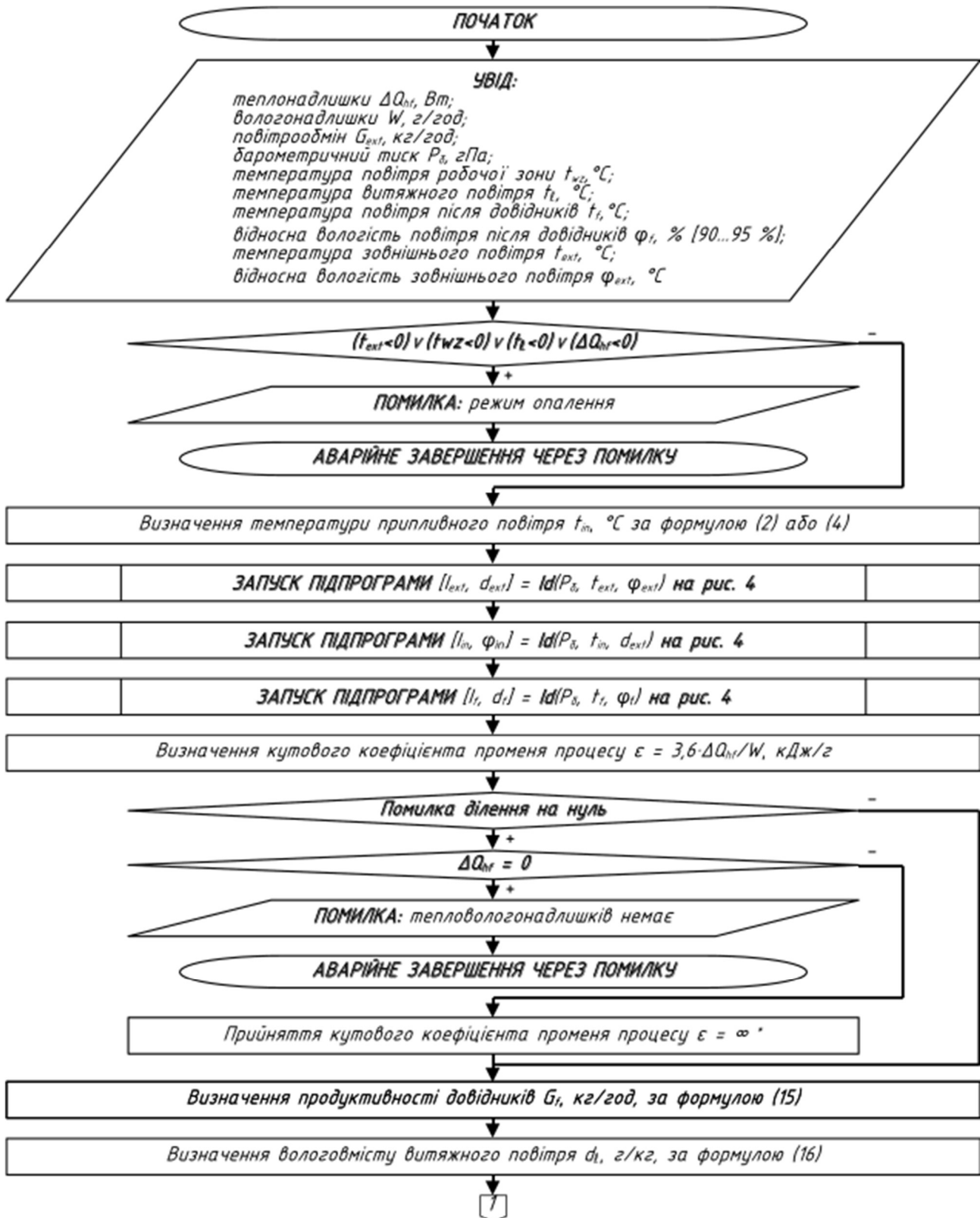
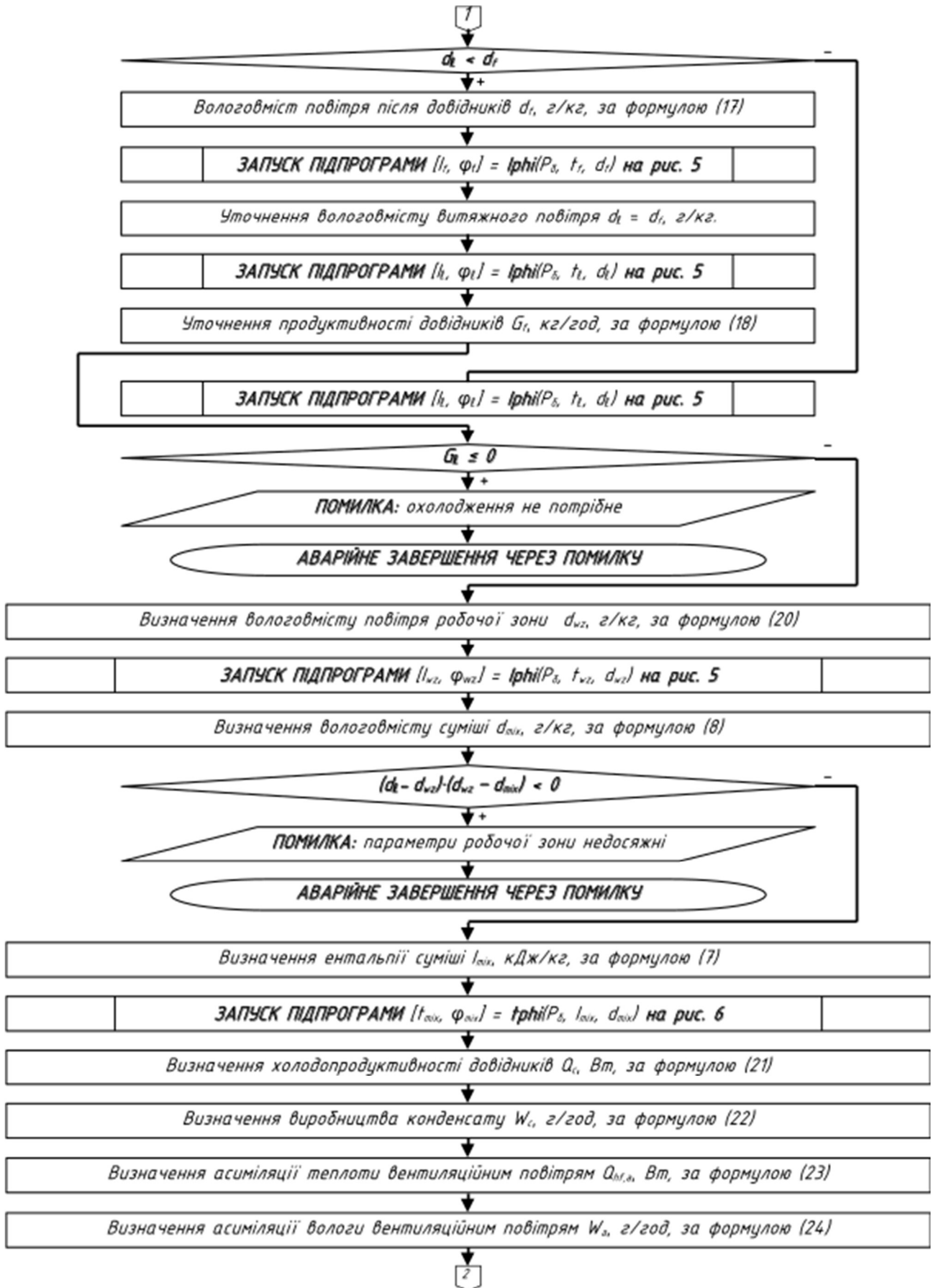
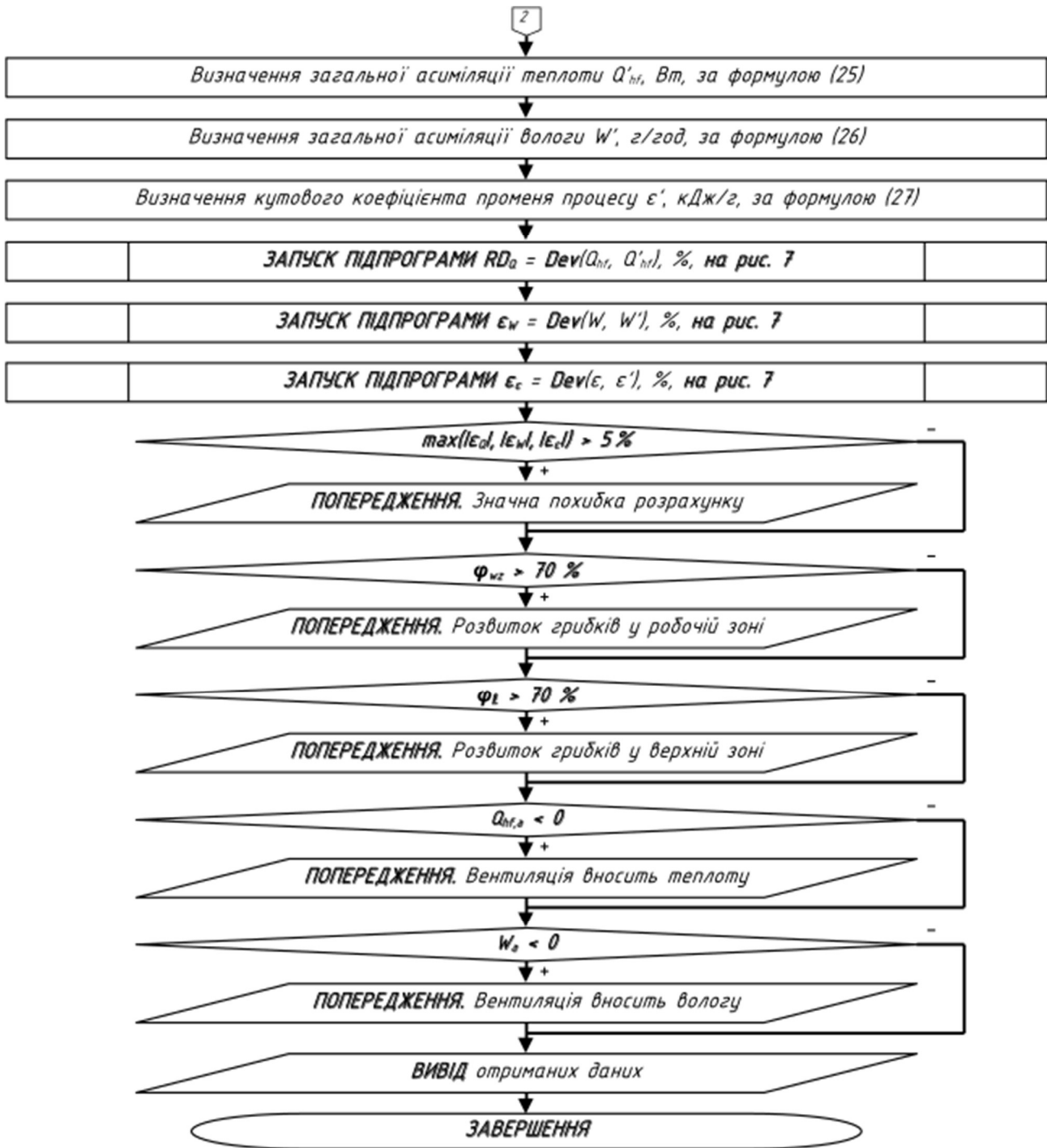


Рис. 3. Моделювання і розрахунок вентиляції з охолодженням:

\* – нескінченність в електронних таблицях та мовах програмування без жорсткої типізації представляється рядком "∞"/"∞", у системах комп'ютерної алгебри нескінченність подається спеціальною вбудованою константою inf (%inf), в інших випадках можна використати максимальне значення для даного типу змінної або окремий флаг



Продовження рис. 3



Закінчення рис. 3.



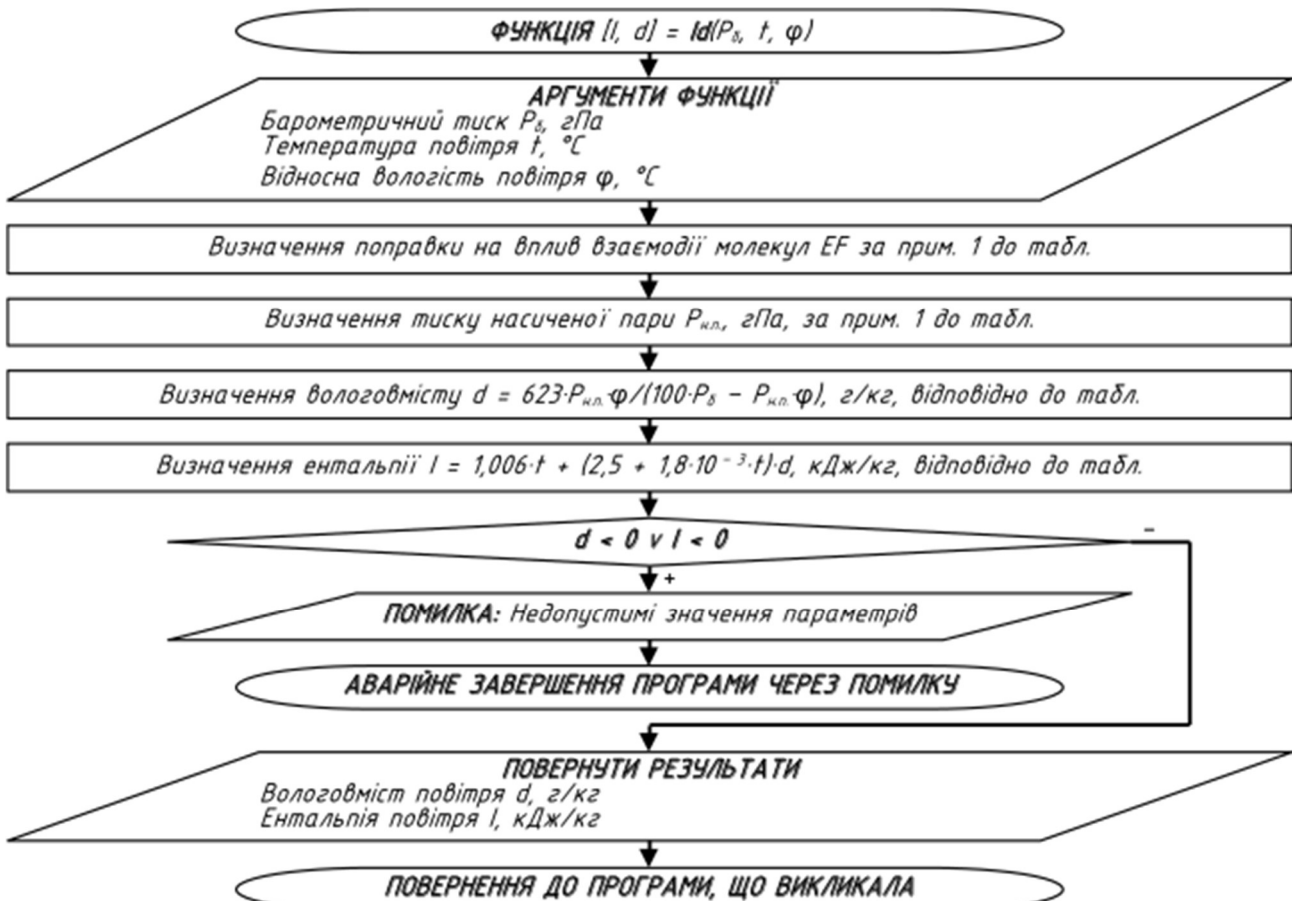


Рис. 4. Функція визначення ентальпії та вологовмісту за барометричним тиском, температурою та відносною вологістю

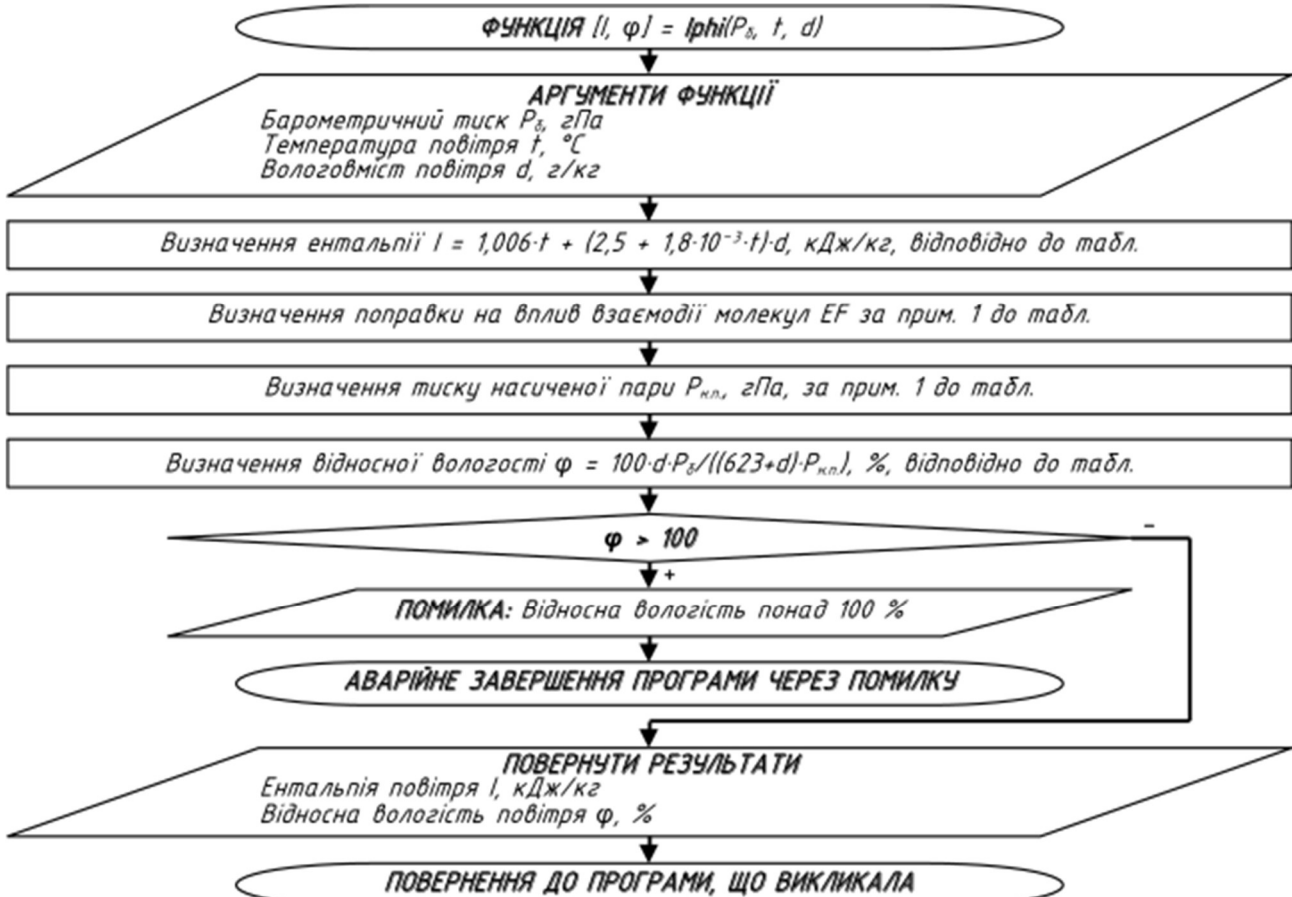


Рис. 5. Функція визначення ентальпії та відносної вологості за барометричним тиском, температурою та вологовмістом

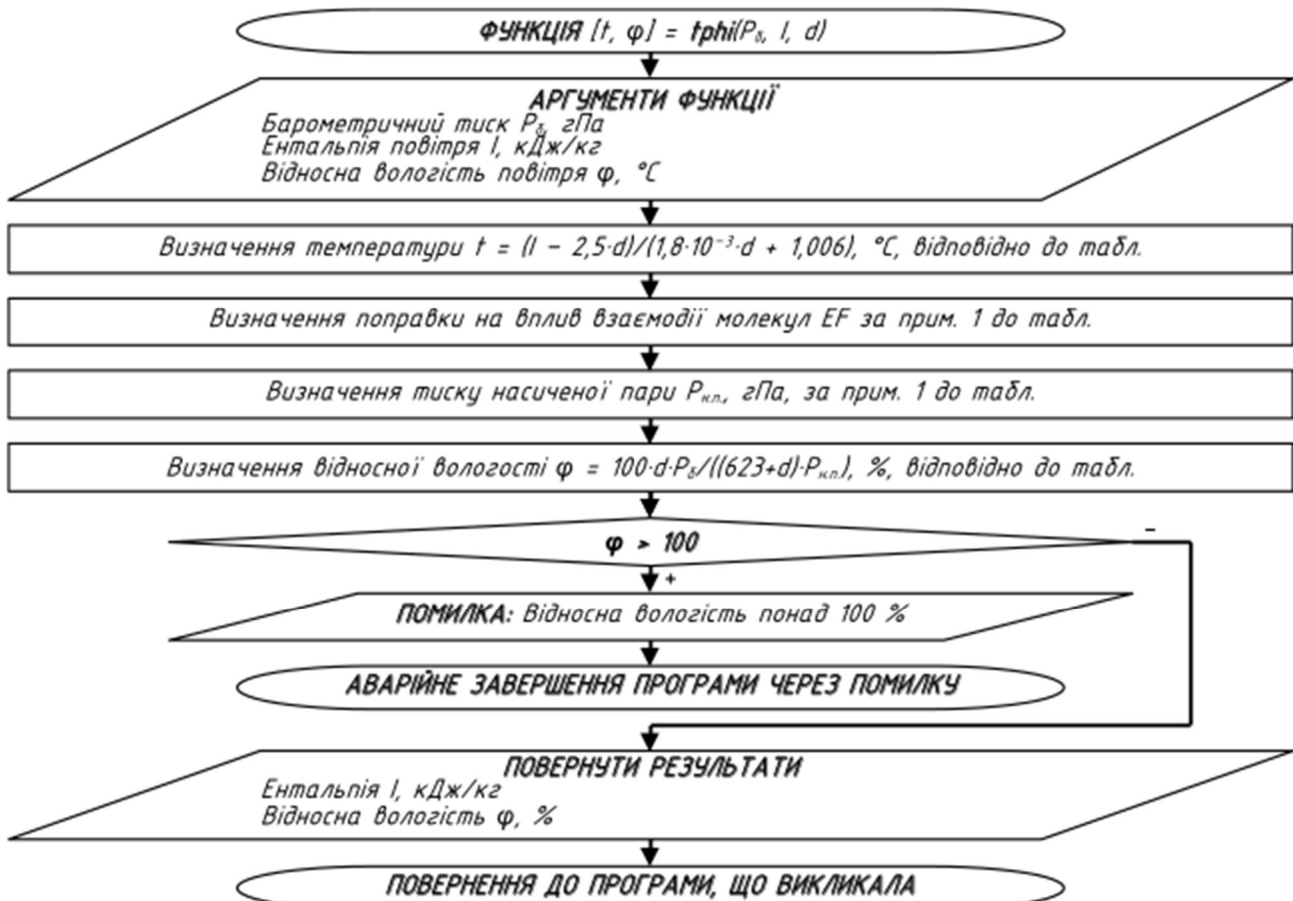


Рис. 6. Функція визначення температури та відносної вологості за барометричним тиском, ентальпією та вологовмістом

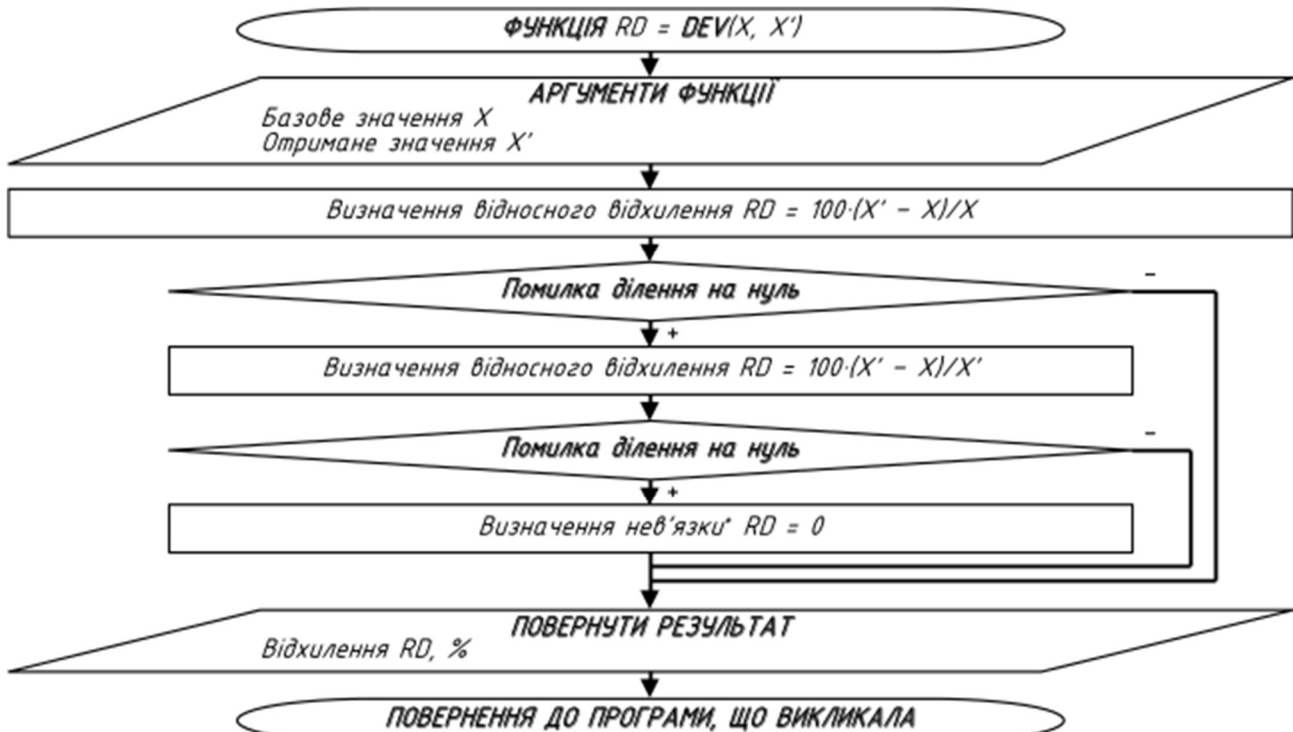


Рис. 7. Функція визначення відносного відхилення з обробленням помилки ділення на нуль:

дозволяє повернути актуальний результат навіть при отриманні максимально великого числа, що може бути представлене в пам'яті комп'ютера, чого важко досягти при перевірках значень аргументів:

\* – якщо ділення на обидва значення викликає ділення на нуль, обидва аргументи нульові, оскільки якщо хоча б один з них не нуль, а лише близький до нуля, то різниця в чисельнику не може бути за модулем несумірно більшою за більший модуль аргументу, тобто викликати в обох випадках помилку; при цьому невизначеність типу 0/0 має бути примусово розкрито як нуль, бо це означає відсутність розбіжності: для перестраховування можна повернути абсолютне відхилення  $RD = X' - X$

За відомим коефіцієнтом повітрообміну можна зменшити повітрообмін, якщо покласти  $q_{wz}$  на рівні гранично допустимої концентрації з певним коефіцієнтом запасу перепаду концентрації  $C < 1$ . Тоді потрібна концентрація або мольна частка вуглекислого газу у витяжному повітрі

$$q_{\ell} = q_{in} + C(q_{MPC} - q_{in}) K_L^{CO_2}. \quad (29)$$

Додаткове перемішування повітря в приміщенні зменшує  $K_L^{CO_2}$  і наближає його до одиниці.

На проблему повернення хвороботворних мікроорганізмів і вірусів почали звертати увагу з початком пандемії коронавірусу. І хоча стан пандемії скасовано, але ані коронавірус ані інші віруси респіраторних захворювань не зникли. У майбутньому можуть з'явитися інші віруси, що можуть спровокувати нову пандемію. Тому проблему зараження людей у приміщеннях слід вирішувати.

На сьогодні ефективним рішенням проблеми повернення зараженого повітря є незараження у спеціальних пристроях ультрафіолетового опромінення повітря в довідниках. Однак, це рішення вимагає додаткового споживання енергії та використання ламп, що при розгерметизації під час, наприклад, утилізації, можуть забруднювати довкілля ртуттю.

Обидві проблеми одночасно й ефективно вирішує біотехнологічний засіб – санаційний фітодизайн. Імунітет рослин передбачає вивільнення спеціальних летких фітоорганічних речовин – фітонцидів. Ці речовини знищують хвороботворні мікроорганізми. І хоча наявність фітонцидів відкрито Борисом Токіним ще у 20-х роках ХХ століття, до сьогодні немає їхнього точного хімічного опису та класифікації. Методи їхнього визначення є непрямими і передбачають виявлення пригнічення розвитку мікроорганізмів.

Зниження концентрації вуглекислого газу відповідає біоритму рослин, що синхронізується з режимом освітлення. Більшість рослин поглинає вуглекислий газ лише під час освітлення. Але можливості штучного подовження періоду фотосинтезу обмежені можливостями самих рослин,

які вимагають обов'язкового періоду лише дихання для відновлення.

Таким чином, при режимі роботи приміщень в одну зміну при освітленні їх у робочий час рослини здатні знизити в робочій зоні концентрацію вуглекислого газу. Вони компенсують повернення цього газу з верхньої зони.

Сукуленти мають інший тип метаболізму – САМ (Crassulacean acid metabolism – кислотний метаболізм типу товстянкових). Він передбачає накопичення енергії під час освітлення та активний газообмін під час темряви або слабкого освітлення.

Як і в будь-яких акумуляційних системах, при даному типі метаболізму виникає подвійна втрата ексергії при заряджанні та розряджанні. Тому для отримання того ж об'єму поглинутого вуглекислого газу потрібна значно більша біомаса, а самі сукуленти мають малі розміри. Тому, зазвичай, сукуленти не є ефективним рішенням проблеми освітлення.

Наприклад, сансев'єрія має як маломірні, так і відносно великі види і швидко розростається. При цьому вона не має жорстких вимог до освітлення. При сильному освітленні вона цвіте і дає сильний запах, який подобеться не всім. Навіть серед авторів даної роботи ставлення до цього запаху вкрай протилежне.

Рекомендований асортимент рослин:

- цитрусові, наприклад лимон (*Citrus Limon*) або грейпфрут (*Citrus paradisi*);
- фікус Бенджаміна (*Ficus Benjamin*);
- аспідистра (*Aspidistra*);
- аглаонема (*Aglaonema*);
- азалія (*Azalea*);
- хлорофітум (*Chlorophytum*);
- драцена (*Dracaena*);
- фуксія (*Fuchsia*);
- монстера (*Monstera*);
- філодендрон (*Philodendron*);
- сансев'єрія (*Sansevieria*);
- шеффлера (*Schefflera*);
- замиакулькас (*Zamiaculcas zamiifolia*).

Більшість з цих рослин має декілька видів, які можна обирати задля максимальної естетичної привабливості інтер'єру.

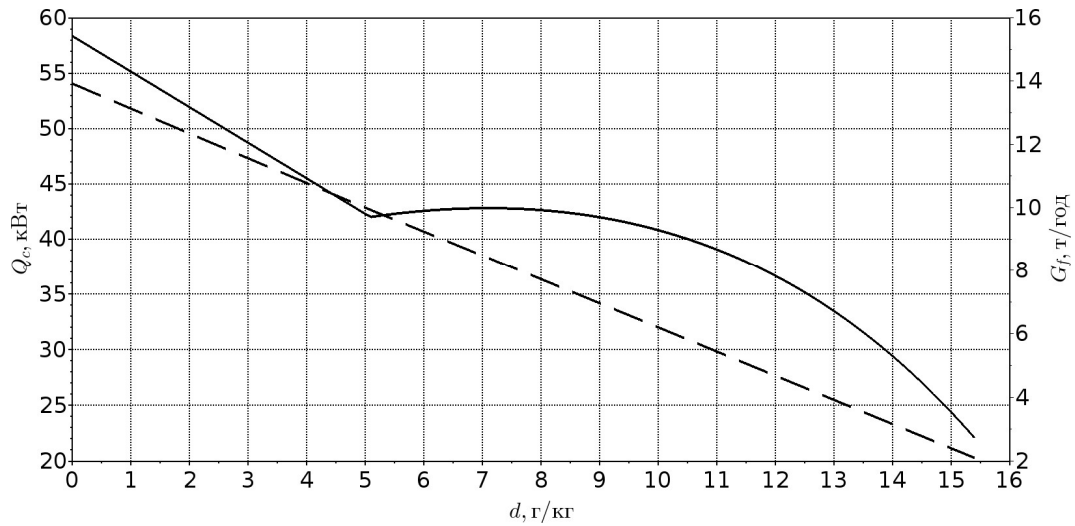


Рис. 8. Залежність холодопродуктивності  $Q_c$ , кВт (суцільна лінія), та продуктивності за повітрям  $G_f$ , т/год (пунктир), довідників від вологовмісту зовнішнього повітря  $d$ , г/кг, при постійній ентальпії зовнішнього повітря 60 кДж/кг: при вологовмісті зовнішнього повітря 14,3 і більше відносна вологість внутрішнього повітря виходить за допустимі межі

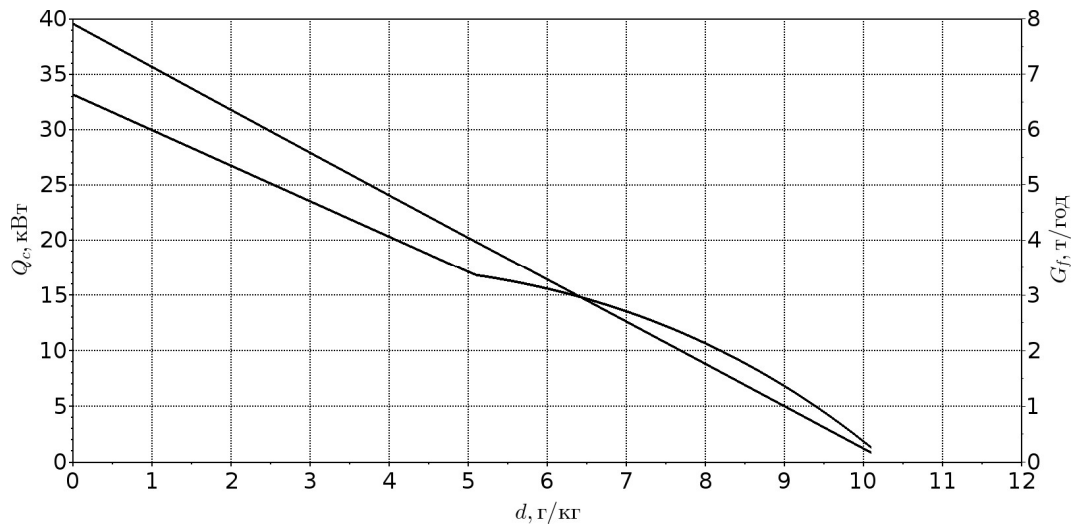


Рис. 9. Залежність холодопродуктивності  $Q_c$ , кВт (суцільна лінія), та продуктивності за повітрям  $G_f$ , т/год (пунктир), довідників від вологовмісту зовнішнього повітря  $d$ , г/кг, при постійній ентальпії зовнішнього повітря 40 кДж/кг

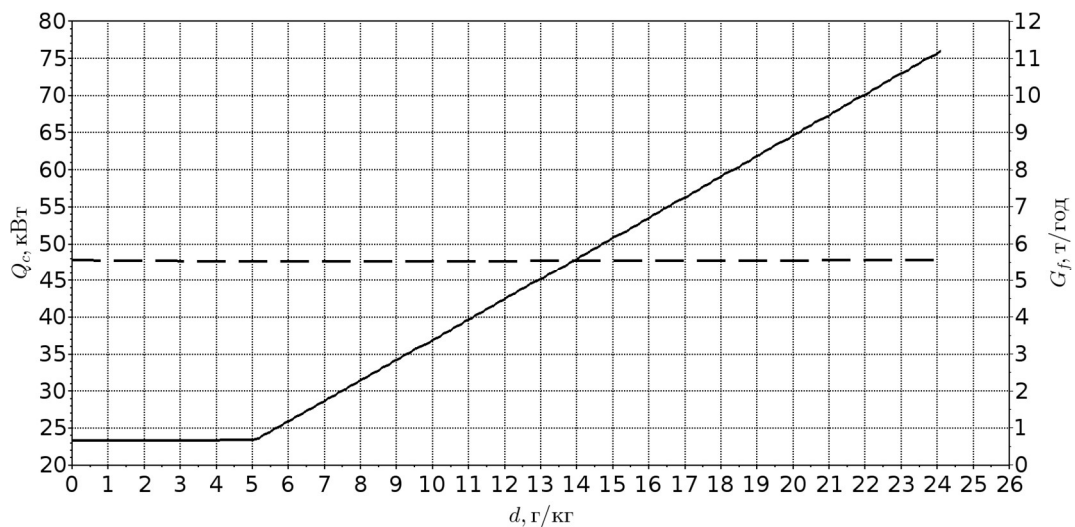


Рис. 10. Залежність холодопродуктивності  $Q_c$ , кВт (суцільна лінія), та продуктивності за повітрям  $G_f$ , т/год (пунктир), довідників від вологовмісту зовнішнього повітря  $d$ , г/кг, при постійній температурі зовнішнього повітря 32 °С: при вологовмісті зовнішнього повітря 15,8 і більше відносна вологість внутрішнього повітря виходить за допустимі межі

**Висновки.** Системи вентиляції з місцевим охолодженням повітря є ефективною заміною системам вентиляції з рециркуляцією. На відміну від останніх, перші не вимагають повернення внутрішнього повітря до припливної камери для підмішування до припливного. Це зменшує витрати енергії на переміщення повітря та габарити вентиляційної установки, повітроводів та іншого обладнання. Для досягнення максимальної енергоефективності з мінімальними затратами такі системи необхідно розраховувати, а не приймати за укрупненими показниками. Розроблений аналітичний опис дозволив скласти алгоритм розрахунку, який вирішує цю задачу. Основним недоліком таких систем є повернення відпрацьованого повітря до робочої зони, що підвищує кількість вуглекислого газу в ній та створює можливість повернення хвороботворних мікроорганізмів і вірусів. Обидві проблеми вирішує

санаційний фітодизайн з використанням асортименту фітонцидних рослин.

**Перспективи подальших досліджень.** На сьогодні завершуються експерименти щодо газообміну в рослинах, що дозволить розрахувати потрібну біомасу для компенсації повернення вуглекислого газу до робочої зони

**Подяки.** Дану роботу виконано в рамках прикладного дослідження з держбюджетним фінансуванням «Створення перспективних технологій формування безпечного середовища будівель поєднанням "зелених конструкцій", фітодизайну та інженерних систем», номер держреєстрації 0122U001197, а також грантової програми Erasmus Plus «Multilevel Local, Nation- and Regionwide Education and Training in Climate Services, Climate Change Adaptation and Mitigation – ClimEd», 619285-EPP-1-2020-1-FI-EPPKA2-CBHE-JP, 15.11.2020 – 14.11.2023.

#### References

1. *Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia*. DBN V.2.5-67:2013, Ukrarkhbudinform, 2013.
2. Yamanaka T., Kuranaga M., Maeda T., Kitakaze H. "Cooling performance of Ceiling Radiant Textile Air Conditioning System with Ceiling Cassette Unit of Packaged Air Conditioner". Built Environment Facing Climate Change Congress (CLIMA-2019.) Bucharest, 26-29 May 2019. *E3S Web of Conferences*, no.111, 2019. 01082. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911101082>
3. Jiankai Dong, Haixia Lan, Yu Liu, Xiaotao Wang, Chenchen Yu. "Indoor environment of nearly zero energy residential buildings with conventional air conditioning in hot-summer and cold-winter zone". *Energy and Built Environment* vol. 3, iss. 2, 2022 pp. 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.12.001>
4. Golinko I., Drevetskiy V. An optimization of a digital controller for a stochastic control system. *IAPGOS* vol. 3 2019. pp 74-77 <https://doi.org/10.35784/IAPGOS.240>
5. Korbut V., Voznyak O., Myroniuk K., Sukholova I. "Examining a device for air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets under alternating mode". *Eastern European Journal of Enterprise Technologies* vol. 2 iss 8(86) 2017, pp. 30-38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96774>
6. Sukholova I., Vozniak O. "Modeliuvannia povitrorozpodilu v prymishchenni u zminnomu rezhymi za dopomohoiu modeli turbulentsnosti Spalarta-Almarasa". *Visnyk NU "LP" "Teoriia i praktyka budivnytstva"* iss. 844 pp. 26-33. <https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-844-2016/modelyuvannya-povitrorozpodilu-v-primishchenni-u>
7. Vozniak O. "Vplyv vzaiemodii strumyn na povitrorozpodil u prymishchenni". *Visnyk NU «Lvivska Politehnika»*. 2001. pp 27-31
8. Dovhaliuk V., Shyshyna M., Moskvitina A. "Rozrakhunok system ventyliatsii ta okholodzhennia povitria hromadskykh budivel". *Vents Magazine* no 2 2018, p. 70-73. [https://ukrblog.vents.ua/wp-content/uploads/2018/12/VM\\_2\\_2018\\_UA1.pdf](https://ukrblog.vents.ua/wp-content/uploads/2018/12/VM_2_2018_UA1.pdf)
9. Dziubenko V. H., Mileikovskiy V. O., Sachenko I. A. "Expansion of the Range of Wet Air I-D Diagram for Environmental Safe Heat Production". *Екологічна безпека та природокористування* vol. 26 no 2 2018, p. 15-22. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.2>
10. *Model CR-1A hygrometer with autofill: Operating manual*. Buck Research Instruments L.L.C., 2012. 26 P. URL: <http://www.hygrometers.com/wp-content/uploads/CR-1A-users-manual-2009-12.pdf>. Access date 20.02.2022. Archived 04.04.2023. URL: <http://web.archive.org/web/20230404194623/https://www.hygrometers.com/wp-content/uploads/CR-1A-users-manual-2009-12.pdf>
11. *DBN V.2.5-67:2013 Opalennia, ventyliatsiia i kondytsionuvannia*. Ukrarkhbudinform, 2013
12. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. New Approach for Refined Efficiency Estimation of Air Exchange Organization. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7, Iss. 3.2, p. 591-596. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14596>

UDC 697.9+72.012.8+614.44

## Analytical studies of the functioning of ventilation with local cooling in public buildings

Vadym Korbut<sup>1</sup>, Tetiana Tkachenko<sup>2</sup>, Viktor Mileikovskiy<sup>3</sup>, Volodymyr Vakhula<sup>4</sup>, Viktoriia Konovaliuk<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Dr Hab., Prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [predsedatel@emw.kiev.ua](mailto:predsedatel@emw.kiev.ua), ORCID: 0000-0002-4560-5463

<sup>2</sup> Dr Hab., Prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>3</sup> Dr Hab., Prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [mileikovskiy@gmail.com](mailto:mileikovskiy@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>4</sup> assist. prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [v.vahula@gmail.com](mailto:v.vahula@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7973-6421

<sup>5</sup> PhD, Assoc. Prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [viktoria.konovalyuk@gmail.com](mailto:viktoria.konovalyuk@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5115-7188

*Abstract. Today, the creation of optimal microclimatic conditions is mandatory for the vast majority of premises in public buildings. The main problem in the cooling period of the year is the minimization of energy consumption. Traditional systems with recirculation require the return of exhaust air to the ventilation unit, which is obviously accompanied by additional energy costs for its movement. In addition, this enlarges air handling units, airducts and other equipment. This problem is not present in ventilation systems with local cooling. They consist of a ventilation system that provides a minimum flow of outdoor air and local closers that take air from the upper or middle zone, cool it and supply it to the room. The work considers the principles of analytical description of processes in a room with the simultaneous operation of ventilation and local cooling. A calculation algorithm and a software based on it have been created. The basis of the analytical description is the simplification that the supply air and the air after the closers are first mixed, and then the mixture participates in the assimilation of excess heat and moisture in the room. The influence of various factors on the productivity and cold performance of the guides is analyzed. It is shown that for maximum energy efficiency with minimum costs, it is necessary to perform the calculation, and not to use aggregated indicators. It is shown that the performance of the closers can exceed the consumption of outside air. The closers return the exhausted air to the working area, which leads to an increase in the carbon dioxide content in it and the possibility of the return of pathogenic microorganisms and viruses to it. It is shown how both problems are solved by a biotechnological measure - remedial phytodesign. The recommended assortment of plants is given.*

*Key words: ventilation with cooling, analytical description, air treatment, assimilation of excess heat and moisture, sanitation, phytodesign.*

Надійшла до редакції / Received 25.03.2023

УДК 66.047.41:[664.8:582.548.21]

## Експериментальні дослідження процесів сушіння бананів

Д. В. Гузик<sup>1</sup>, О. В. Череднікова<sup>2</sup>, Д. О. Дубчак<sup>3</sup>, Б. М. Нестеренко<sup>4</sup>, А. С. Передерій<sup>5</sup>, О. Г. Сімон<sup>6</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна, [guzikd64@ukr.net](mailto:guzikd64@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2130-951X

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна, [al.chered108@gmail.com](mailto:al.chered108@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4684-9870

<sup>3</sup>студ., Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна, [dima.dubchak.2004@gmail.com](mailto:dima.dubchak.2004@gmail.com)

<sup>4</sup>студ., Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна, [bogdannesterenko51@gmail.com](mailto:bogdannesterenko51@gmail.com)

<sup>5</sup>студ., Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна, [aia.prdry020104@gmail.com](mailto:aia.prdry020104@gmail.com)

<sup>6</sup> студ. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна, [tr13xh@gmail.com](mailto:tr13xh@gmail.com)

*Анотація. У статті розкрито актуальність теми – визначення ефективного способу підвищення терміну збереження продуктів харчування. Проаналізовано новітні дослідження та публікації, присвячені теоретичним і практичним аспектам технології виробництва сухих харчових продуктів. Визначено найважливіші вимоги до сушильних систем, розглянуто основні способи сушіння фруктових сировини, сформульовано цілі роботи. Представлено конструкцію камерної конвекційної сушарки для проведення випробувань в лабораторії кафедри теплогазопостачання, вентиляції і теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Наведені отримані результати з сушіння бананів, їх аналіз та порівняння з вибором оптимального варіанта режиму сушки. Представлені висновки з виконаної роботи.*

*Ключові слова: штучне конвективне сушіння, сушильна камера, сировина, сушильний агент.*

**Вступ.** В умовах сьогодення для керівництва будь-якої країни світу гостро стоїть питання забезпечення громадян продуктами харчування. Сушіння – це ефективний спосіб зберігання смакових якостей сировини, який дозволяє зберегти біологічно активні речовини та збільшити їх термін придатності. Зважаючи на те, що в нашій країні введений воєнний стан та йде повномасштабне вторгнення країни-агресора, нашим захисникам потрібне швидке насичення організму. Військові, які виконують бойові завдання не завжди можуть повноцінно харчуватися, а організму потрібне швидке відновлення сил.

**Актуальність дослідження.** Сушіння сировини, зокрема продуктів харчування, дозволяє збільшити термін зберігання продукції за умов дотримання відповідних умов її зберігання [1,2]. Цей метод консервації є простим та економічним і дозволяє зменшити об'єми приміщень для зберігання продукції. Щоб зберегти зовнішній вигляд та корисні речовини продукту (бананів), важливо стежити за тим, щоб процес сушіння відбувався з дотриманням рекомендованого технологічного режиму (температури, вологості та швидкості руху сушильного агента) [3].

**Формулювання цілей статті.** Метою проведення експериментальних досліджень з сушки бананів (бананових слайсів) було визна-

чення оптимальних умов сушіння для збільшення їх терміну придатності, збереження якості та корисних речовин продукту. Дослідження включало в себе визначення впливу температури та швидкості повітря (сушильного агента) на процес штучного конвективного сушіння, а також визначення за результатами натурних експериментів оптимальних умов для отримання на виході якісної продукції.

**Основна частина.** Сушка продуктів харчування – це процес, який можна виконувати за різними методами. Для цього можна використовувати природні теплові джерела, такі як сонце, повітря або тепло, або ж використовувати спеціальні устаткування, які забезпечують штучне підігрівання. Крім того, існують інші методи сушки, такі як сушка під вакуумом або у середовищі рідкого азоту. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, тому вибір методу залежить від багатьох факторів, таких як тип сировини, вимоги до якості продукції, доступність устаткування та інші.

*Сушіння бананів природним теплом* – це процес, який відбувається за допомогою природних джерел тепла, таких як сонце та повітря. В цьому методі сушки свіжі банани поширюють на поверхні з плоскими та чистими місцями, де є добра вентиляція та протяг. Банани потрібно регулярно перемішувати, щоб забезпечити рівномірне сушіння.



Сонячне сушіння полягає в тому, що сировину розкладають на спеціальних площадках на відкритому повітрі з доступом до сонячних променів. Цей метод досить простий і ефективний, але його можливості обмежені погодними умовами та потрібен регіон зі стабільним та сильним сонячним випромінюванням і потребує наявності відкритих місць для сонячної експозиції.

Повітряно-тіньове сушіння виконується в приміщеннях з відкритими вікнами або вентиляційними отворами, що забезпечує природний потік повітря і відвід від негативних впливів сонячних променів. Цей метод дозволяє зберегти якість сировини, але тільки в умовах низької вологості повітря.

Обидва методи дозволяють зберегти корисні речовини в бананах, збільшити термін їх придатності та зменшити об'єми приміщень для їх зберігання, проте вони не завжди ефективні в умовах високої вологості повітря та не дозволяють досягти оптимального ступеня сушіння.

*Штучна сушка бананів* передбачає використання тепла, що створюється за допомогою електричних нагрівальних елементів, гарячого повітря або інфрачервоного випромінювання. Цей метод сушки є одним з найбільш ефективних, оскільки дозволяє швидко видалити вологу з продукту і забезпечити його стабільну якість та довготривалу збереженість.

У процесі штучної сушки бананів, свіжі плоди обробляються теплом, що забезпечує випаровування вологи з поверхні фруктів. Волога збирається у вигляді пари і відводиться з сушарки за допомогою вентиляційної системи. Чим швидше відводиться волога, тим швидше відбувається процес сушіння.

Крім того, важливо правильно підготувати фрукти до сушіння, знявши з них всі зовнішні пошкодження та очистивши від будь-яких забруднень. Також необхідно забезпечити вільний доступ повітря до продукту, щоб забезпечити рівномірне сушіння.

У результаті штучної сушки бананів отримується продукт, що має стабільний вологість і довготривалий термін зберігання. Такий спосіб сушки є ефективним для масового виробництва.

*Сушка бананів в вакуумі* є одним зі способів консервування фруктів та зберігання їх біологічно активних речовин. Процес сушіння відбувається за рахунок зменшення атмосферного тиску, що сприяє випаровування вологи з продукту при низькій температурі.

Спочатку банани піддаються попередній обробці, наприклад, промиванню та очищенню від зовнішніх забруднень. Далі їх нарізають на кришталево-чисті круглі скибочки товщиною близько 5 мм. Потім скибочки бананів розкладають у спеціальних пакетах для сушіння в вакуумі.

Пакети запаяні та готові для процесу сушіння. Сушіння відбувається в спеціальному обладнанні, де пакети з бананами поміщаються в камеру з вакуумним насосом. Насос зменшує тиск у камері до певного рівня, що сприяє ефективному випаровуванню вологи з бананів.

Після сушіння в вакуумі банани стають хрусткими та легкими. Цей метод зберігання їх дозволяє зберегти максимальну кількість біологічно активних речовин, включаючи вітаміни та мінерали, що робить їх корисними для здоров'я.

Іншою перевагою сушки бананів в вакуумі є збереження смакових якостей та аромату фруктів. Крім того, такий метод зберігання дозволяє продовжити термін придатності продукту до кількох років. Однак, процес сушіння в вакуумі може бути досить складним та вимагати спеціального обладнання та навичок.

*Сушка бананів у середовищі рідкого азоту* є одним зі способів збереження продукту і використовується, зокрема, в харчовій промисловості та в косметології.

Суть цього методу полягає в тому, що банани поміщають в камеру, де створюють високий тиск та низьку температуру. За рахунок цього, вода у бананах переходить у стан твердого або газоподібного азоту, не залишаючись в продукті у вигляді рідини, що дозволяє зберегти якість та корисні властивості бананів.

Основною перевагою цього методу є те, що він дозволяє зберегти більшість вітамінів, мінералів та інших корисних речовин у бананах. Також, зберігання бананів у середовищі рідкого азоту зменшує ризик розвитку плісняви та інших шкідливих мікроорганізмів.

Проте, використання цього методу має деякі обмеження. Особливої уваги потребує правильна підготовка бананів до сушіння, так як вони можуть пошкодитись через різку зміну температури. Також, обладнання для зберігання бананів у середовищі рідкого азоту є досить дорогим, тому використовується переважно у високотехнологічних виробництвах.

**Опис стенду.** Для дослідження процесу сушіння використовували камерну конвективну сушарку, яка знаходиться в лабораторії кафедри теплогазопостачання, вентиляції і теплоенергетики Національного університету "Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка" (Рис. 1) [4,5].



Сушильна камера для сировини є основним елементом даного лабораторного стенду (Рис. 2) [6,7]. Вона виготовлена з дерев'яних щитів, з утепленням з пінополістиролу товщиною 25 мм. Додатково для зменшення тепловтрат внутрішня поверхня сушильної камери вкрита шаром харчової фольги. Стенд містить дверцята в яких виготовлено оглядове віконце. Воно допомагає спостерігати за процесом сушіння і температурою всередині камери. Камера обладнана лампою холодного світла.

Рух повітря (агента сушіння) в стенді забезпечує каналний вентилятор шведської фірми "Systemair" марки KV160M з можливістю зміни витрати за допомогою регулятора кількості обертів робочого колеса нагнітача. Температурний режим під час проведення натурних вимірювань регулювався за допомогою електричного калорифера фірми "AeroStar" (м. Київ, Україна) марки SEH 50-25/22,5. Калорифер має 9-ть ТЕНів, потужність 2,5 кВт кожний.



Рис. 2 Загальний вигляд робочого простору камери: 1 – лампа освітлення, 2 – термометр фіксації температури агента сушіння в камері, 3 – решітки для розміщення сировини



Рис. 1 Лабораторний стенд для проведення натурних досліджень: 1 – камера, 2 - каналний вентилятор, 3 - електрокалорифер, 4 – термометри для фіксації температури агента сушіння до та після камери, 5 – регулятор кількості обертів робочого колеса нагнітача, 6 – вікно для візуального спостереження процесу сушіння, 7 – ваги

**Проведення натурних досліджень.** При проведенні досліджень ставилась задача визначення інтенсивності зменшення ваги продукту – слайсів бананів і отримання вихідного якісного кінцевого продукту в результаті варіації змін кіль-

кісно-якісних показників параметрів агента сушіння (повітря) – тобто його температури та кількості (швидкості руху) при проходженні його крізь робочий об'єм камери сушіння.

У відповідності до рекомендацій з сушіння бананів нами були проведені експерименти для

визначення рівню впливу на інтенсивність зміни ваги продукту – швидкості руху агента сушіння та його температури.

Температура агента сушіння в даній установці може регулюватись шляхом увімкнення різної кількості ТЕНів та одночасною зміною швидкості руху повітря і відповідно його витрати. Останній параметр визначався відносно швидкості повітря, яка вимірювалась електронним анемометром в місці виходу повітря зі шафи через патрубок круглого перетину діаметром 160 мм.

Сам експеримент складався з двох етапів, при увімкненні 2-ох ТЕНів (загальною потужністю 5 кВт), та лише зміні витрати агента сушіння, який проходив через сушильну камеру. При цьому середня температура в робочому просторі камери в першому та другому експериментах підтримувалась на рівні:  $t_{\text{кам}} = 49,3 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $t_{\text{кам}} = 69 \text{ }^\circ\text{C}$ , що близько до рекомендованого значення температури сушіння бананів на рівні  $50 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . За результатами експериментів був побудований графік зміни температури у камері сушіння (Рис. 3).

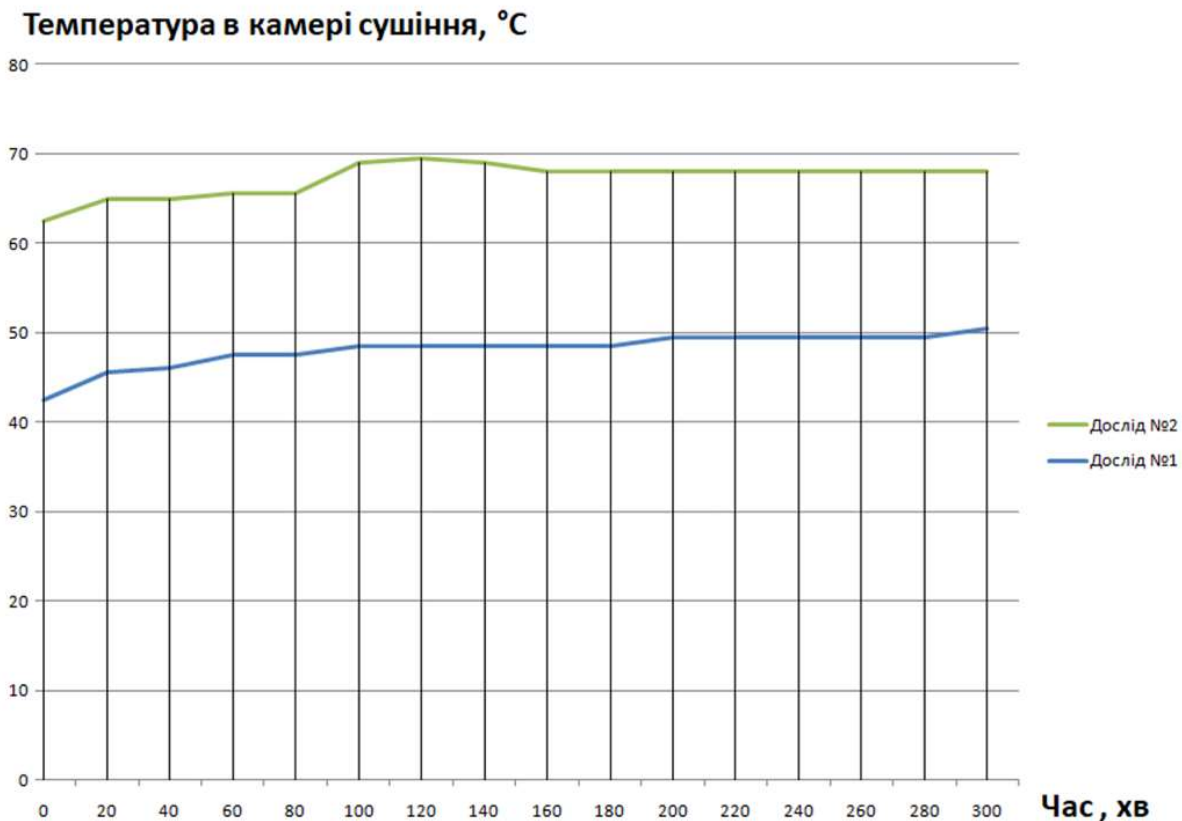


Рис. 3 Графік зміни температури у камері сушіння

Головним параметром, який визначався в ході експерименту була зміна маси сировини (від початкової ваги) за певний проміжок часу і отримання в результаті якісної продукції. На кожному етапі проведення дослідів, було виділено 5 годин. Для сушіння були використані банани (Рис. 4).

До початку експериментів завчасно вмикався стенд для встановлення сталого температурного режиму в камері. Перед розміщенням сировини в сушильну камеру її попередньо було зважено. В процесі експерименту проводяться заміри маси сировини (її зміни) за певний проміжок часу, а саме кожні 20 хвилин проведення експерименту. Банани були порізані на слайси товщиною 0,5 мм та розкладені по всій площині

решітки (Рис. 5, 6).



Рис. 4 Підготовка сировини для проведення експерименту



Рис. 5 Слайси бананів на решітці перед завантаженням у камеру



Рис. 6. Сировина в камері сушіння

Для коректного зняття показів ваги (її зміни в часі) слайсів бананів використовувалось “дистанційне” вимірювання ваги решітки разом з дослідною партією сировини за допомогою встановлених і з’єднаних через подовжувач електронних вагів з можливістю точних вимірювань зміни ваги до 0,01 гр. (Рис. 7).

Результати двох дослідів були зведені в таблицю 1.



Рис. 7 Процес зняття показів ваги сировини



## Результати досліджень

Номер досліджу		1	2
Теплова потужність ТЕНів , кВт		5	
Середня температура в камері сушіння, °С		49,3	69
Швидкість агента сушіння в камері, м/с		0,4	0,24
Положення регулятора швидкості		5	3
Маса сировини, гр	початкова 0 хв.	0,353	0,353
	після 20 хв.	0,319	0,243
	після 40 хв.	0,319	0,243
	після 60 хв.	0,269	0,243
	після 80 хв.	0,269	0,193
	після 100 хв.	0,269	0,193
	після 120 хв.	0,269	0,193
	після 140 хв.	0,219	0,193
	після 160 хв.	0,219	0,123
	після 180 хв.	0,219	0,123
	після 200 хв.	0,219	0,123
	після 220 хв.	0,219	0,123
	після 240 хв.	0,219	0,123
	після 260 хв.	0,219	0,123
	після 280 хв.	0,169	0,123
після 300 хв.	0,169	0,123	

За результатами двох дослідів можна проаналізувати як відбувався процес сушіння. Для більш чіткого поняття інтенсивності сушки слайсів бананів, був побудований графік зменшення маси за 5-ть годин на протязі кожної серії експерименту (Рис. 8).

За результатами досліджень можна зробити попередній висновок, що найбільш оптимальним варіантом сушіння слайсів бананів був отриманий за умов досліджу №2, а саме: при температурі в камері конвективного сушіння 69 °С (рекомендована 50-70 °С), та швидкості

руху агента сушіння 0,24 м/с. При таких параметрах агента сушки втрачається найбільше вологи, а з точки зору технології сушіння ми не вийшли за рамки рекомендованого температурного режиму і можемо отримати якісну продукцію (слайсів бананів) з мінімальними енергетичними втратами. Як видно з останнього графіку при проведенні експерименту №2 – вже за дві години і 40 хвилин маса сировини не змінювалась, що краще за показники експерименту №1.

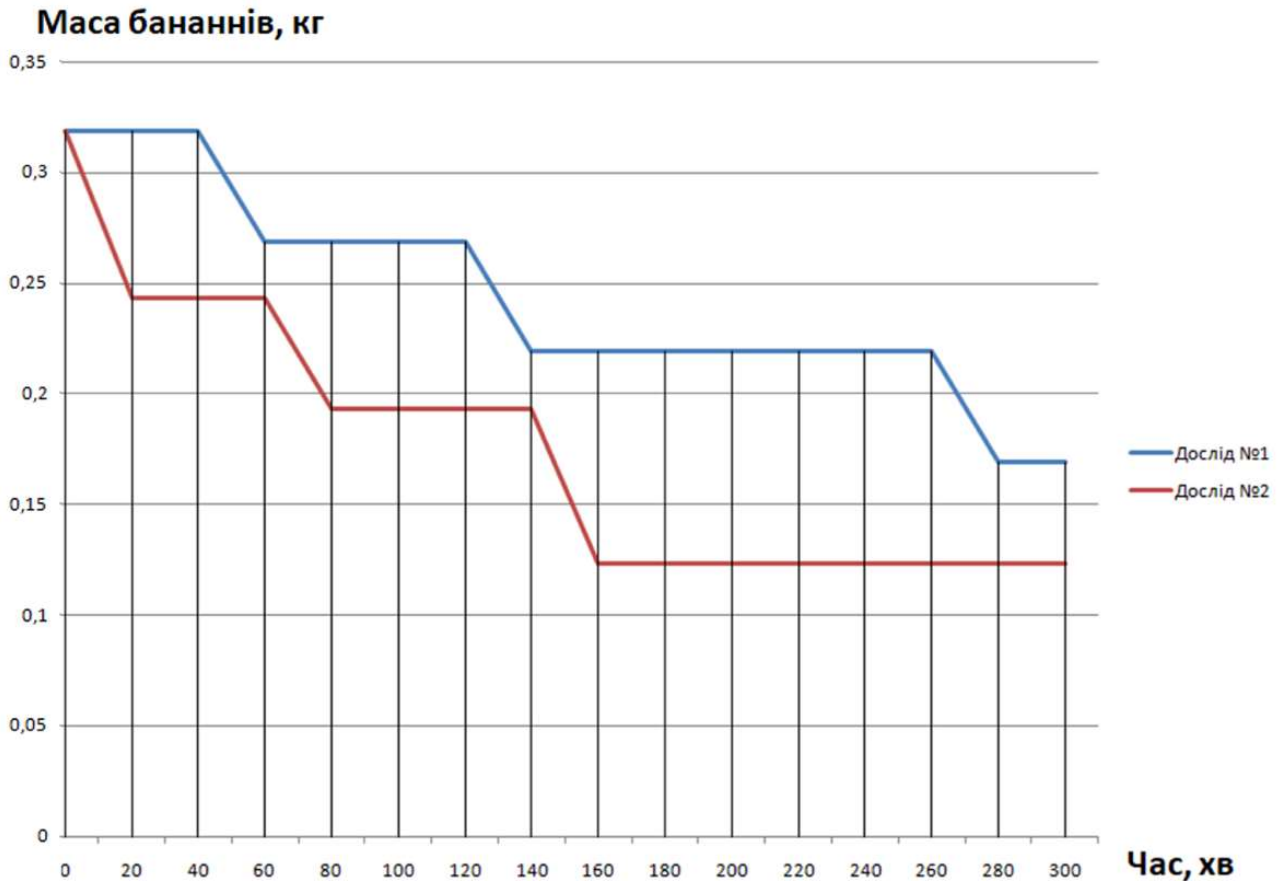


Рис. 8. Графік зміни маси сировини відносно часу знаходження у камері сушіння

**Висновки.** Порівняльний аналіз способів сушіння з точки зору термінів отримання якісного кінцевого продукту дає перевагу на користь штучного конвективного сушіння. Для отримати на виході якісного продукту сушіння потрібно використовувати установки з можливістю одночасної зміни кількісно-якісних параметрів агента сушіння (температура і швидкість руху повітря). Для досягнення коректної фіксації показів зміни температури агента сушіння та ваги сировини, процес зняття показів цих параметрів необхідно проводити без порушення температурного режиму сушильної камери – застосовуючи засоби візуального зняття показів

температури та “дистанційного” зняття ваги, так як це реалізовано на даному стенді. З проведених дослідів було визначено найбільш доцільний варіант сушіння бананів, в якому була отримана якісна сировина за менший проміжок часу та з мінімальними енергозатратами, а саме: при температурі в камері 69 °С, та швидкості руху повітря 0,24 м/с. Для проведення детального аналізу фактичних енергетичних і експлуатаційних витрат при кожному режимі сушки необхідно проведення додаткових лабораторних досліджень на даному устаткуванні.

#### References

1. Ткаченко С. Й. Сушильні процеси та установки : навч. пос./ С. Й.Ткаченко, О. Ю.Співак. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – Режим доступу: <http://tkachenko.vk.vntu.edu.ua/file/cda121b838067ae3ea7278d7f3afc556.pdf> – Назва з екрана.
2. О.С. Бессараб Технологія сушіння плодів та овочів : консп. лек./ О.С. Бессараб, В. В. Шутюк. - Київ: НУХТ, 2002. – Режим доступу: [http://ktc.nuft.edu.ua/wp-content/uploads/pdf/Technologiya\\_sushinnya\\_plodiv\\_ta\\_ovosthiv.pdf](http://ktc.nuft.edu.ua/wp-content/uploads/pdf/Technologiya_sushinnya_plodiv_ta_ovosthiv.pdf) – Назва з екрана.
3. Комп’ютерна система керування сушильною камерою Режим доступу: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/541/524>.
4. Експериментальні випробування лабораторного стенда для дослідження процесів сушіння / к.т.н., доц., Гузик Д. В., Єршов М. П. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 27 / відповідальний редактор Е. С. Малкін. – Київ: КНУБА, 2018. – С. 52-60 с.

5. Гузик Д. В. Експериментальні дослідження процесів сушіння лікарських рослин / Д. В. Гузик, О. Б. Борщ, А. В. Рибалка // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. - Вип. 30 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, - 2019. - С. 43-50.

6. Гузик Д.В. Лабораторні дослідження процесів сушіння лікарських трав при застосуванні примусової конвекції / Д.В.Гузик, А.В.Рибалка // Тези 71-ої наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 2. (Полтава, 22 квітня – 17 травня 2019 р.) – Полтава: Полт НТУ, 2019. – С. 180-181.

7. Гузик Д.В. Експериментальні дослідження процесів сушіння фруктів / Д.В. Гузик, А.В. Рибалка / Збірник наукових праць матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики» присвяченої 100-річчю професора Бориса Харлампієвича Драганова, 10-11 грудня 2020, р., за організацією Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, 2020. С. 155-170.

**UDC 697.91:697.97**

## **Experimental studies of banana drying processes**

Dmitriy Guzyk<sup>1</sup>, Oleksandra Cherednikova<sup>2</sup>, Dmytro Dubchak<sup>3</sup>, Bohdan Nesterenko<sup>4</sup>, Alina Perederii<sup>5</sup>, Oleksiy Simon<sup>6</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, [guzikd64@ukr.net](mailto:guzikd64@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2130-951X

<sup>2</sup>PhD, associate professor, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, [al.chered108@gmail.com](mailto:al.chered108@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4684-9870

<sup>3</sup>Student, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, [dima.dubchak.2004@gmail.com](mailto:dima.dubchak.2004@gmail.com)

<sup>4</sup>Student, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava Ukraine, [bogdannesterenko51@gmail.com](mailto:bogdannesterenko51@gmail.com)

<sup>5</sup>Student, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, [aia.prdry020104@gmail.com](mailto:aia.prdry020104@gmail.com)

<sup>6</sup>Student., National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, [tr13xh@gmail.com](mailto:tr13xh@gmail.com)

*Abstract: In today's conditions, the issue of providing citizens with food products is an actual task for the leadership of any country in the world. Considering the fact that our country is under martial law and a full-scale invasion of the aggressor country is underway, our defenders need a quick saturation of the body. Soldiers performing combat tasks cannot always eat well, and the body needs quick recovery. Drying is an effective method of preserving the taste qualities of raw materials, which allows you to preserve biologically active substances and increase their shelf life. The design of a chamber convection dryer for testing in the laboratory of the Department of Heat and gas supply, ventilation, and thermal power engineering of the National University "Yuri Kondratiuk Poltava Polytechnic" was presented. The obtained results of banana drying, their analysis, and comparison with the selection of the optimal option for the drying mode were given. A comparative analysis of drying methods to obtain a high-quality final product gives an advantage in favor of artificial convective drying. In order to obtain a high-quality drying product at the output, it is necessary to use installations with the possibility of simultaneously changing the quantitative and qualitative parameters of the drying agent (temperature and speed of air movement). From the conducted experiments, the most appropriate variant of banana drying was determined, in which high-quality raw materials were obtained in a shorter period of time and with minimal energy consumption, namely: at a temperature in the chamber of 69 °C and an air movement speed of 0.24 m/s. In order to carry out a detailed analysis of the actual energy and operating costs for each drying mode, it is necessary to conduct additional laboratory tests.*

*Keywords: convective drying, drying chamber, raw materials, drying agent.*

Надійшла до редакції / Received 28.03.2023

УДК (622.807:622.235.3)

## Розробка багатофункціональної установки дрібнодисперсного зрошення

В. Г. Наливайко<sup>1</sup>, В. А. Коновалюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, vadim.moris@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4452-6111

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, konovaliuk.va@knuba.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5115-7188

**Анотація.** Інтенсифікація процесів видобутку і переробки мінеральної сировини, характерних для сучасного розвитку гірничодобувного виробництва, пов'язана зі значним забрудненням атмосферного повітря пилом. В якості економного і мобільного засобу пилоподавлення рекомендується розроблена установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення «Устімор». Принцип роботи установки заснований на імпульсному витисненні води з водоповітряного баку продуктами згоряння паливоповітряної суміші під високим тиском (>5 МПа). На хвостосховищі ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» були проведені дослідно-промислові випробування установки. Дальнобійність установки в середньому 120-130 м. Площа зрошуваної поверхні за один цикл експлуатації від 500 м<sup>2</sup> до 750 м<sup>2</sup>. Дрібнодисперсне розпилювання спостерігалось по всій довжині польоту струменя. За одну годину роботи установка може подати в атмосферу у вигляді моросі від 5 до 30 тон води. Інтенсивність поливу за один цикл роботи в середньому 0,85 л/м<sup>2</sup>. Підтверджено можливість автономної роботи установки і її дистанційного керування через систему SCADA. Установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення рекомендується до застосування в якості засобу для розпилення рідини методом дрібнодисперсного зрошення на відкритих ділянках поверхонь, де інтенсивно взмітається і зависає пил. Вона може бути використана для пилоподавлення і зволоження на хвостосховищах, складах сипучих матеріалів, відвалах, технологічних автодорігах. Установку «Устімор» можна використовувати і для дрібнодисперсного поливу насаджень, виноградників, садів тощо. Зрошення листвяного покриття і поверхні ґрунту дозволить знизити їх температуру на 7 - 10 °С на сонці і на 6 - 6,6 °С в тіні.

**Ключові слова:** пилоподавлення, дрібнодисперсне зрошення, багатофункціональна установка

**Вступ.** Дисперговані струмені рідин і технології на їх основі використовуються в різних сферах діяльності людини. Однак розширення сфери застосування методів їх отримання обмежується вузькістю діапазону регулювання дисперсності при фіксованій витраті рідини і низькій дальнобійності отриманих крапельних потоків.

**Останні дослідження та публікації.** Теорія гідравлічного розрахунку імпульсного дощувального апарату відома. Однак при проведенні розрахунку не враховують локальні сили інерції, їх сумісну роботу зі зрошувальною мережею і насосним устаткуванням, що призводить до значних похибок в результатах досліджень.

У зв'язку з цим необхідні додаткові дослідження та проведення гідравлічного розрахунку імпульсного дощувального апарату, які включають визначення:

– часу дощування і максимальної швидкості вильоту струменя дощувального струменя з насадки;

– часу заповнення гідроакумулятора водою до верхнього тиску;

– обсягу викиду води за один цикл з апарату на зрошувальну ділянку.

Аналіз публікацій по розпаду рідинних струменів показав, що кількість робіт, присвячених

вивченню впливу на процес диспергування струменів імпульсів тиску, вкрай обмежена. При цьому відомі результати експериментальних досліджень носять переважно якісний характер і не можуть бути використані для побудови узагальнюючих емпіричних залежностей, які встановлюють об'єктивні зв'язки між характеристиками дисперсності, формою факелу гідрімпульсного струменя і параметрами його витікання.

Тим не менш, процес поширення використання імпульсних установок дрібнодисперсного зрошення з роками тільки збільшується. В даний час відомі випадки використання установок імпульсного дрібнодисперсного зрошення в гірничодобувній промисловості, в сільському господарстві як засоби поливу, при гасінні пожеж.

Один із поширених засобів колективного захисту працівників від потужного теплового випромінювання є водяні завіси [1], тобто певним чином влаштовані струмені розпиленої води.

Вони мають наступні переваги перед іншими засобами захисту:

1) швидке реагування обладнання в разі раптового виникнення небезпеки;

2) можливість встановлення в будь-якому місці без утворення додаткових перешкод діяльності підприємства;

3) органічне поєднання з автоматичними системами водяного пожежогашіння;

4) екологічна безпека.

Завдяки цим перевагам захисні системи для створення водяних завіс отримали широке використання на підприємствах і в установах, де вони сприяють забезпеченню необхідних умов праці на робочих місцях, усуненню професійних травм, нещасних випадків і аварій.

Водяні завіси є найбільш поширеним обладнанням, яке використовують для обмеження поширення в атмосфері хімічно небезпечних і пожежевибухонебезпечних речовин. При цьому в ряді досліджень увага зосереджена на тому, що найбільший ефект при їх застосуванні обумовлений саме залученням водними струменями повітря з небезпечними домішками з подальшим їх перемішуванням і розсіюванням, що дозволяє значно знизити концентрацію небезпечних речовин за завісою.

Таким чином, з метою забезпечення належних умов охорони праці існує реальна потреба в розробці та створенні захисних систем типу водяних завіс.

**Застосування установок дрібнодисперсного дощування в сільському господарстві.** Для деяких видів рослин бажано подавати воду за допомогою дощувальних апаратів імпульсної дії або «дощувальних гармат». При цьому дощувальний струмінь «вистрілюється» через певні проміжки часу.

Дрібнодисперсне дощування (аерозольне зволоження) використовується для регулювання мікроклімату приземного шару повітря на плантаціях багаторічних насаджень. Суть даного способу поливу полягає в періодичному (1 раз на протязі 1,5 години) диспергуванні (розпиленні) води над зрошуваним масивом в термічно напружений час доби. Краплі води залишаються на листі до повного випаровування. Такий полив підвищує вологість повітря поблизу ґрунту, сприяє зниженню температури повітря і листової поверхні рослин (на 6-12 °С), отже усуненню умов депресії фотосинтезу, підвищенню продуктивності сільськогосподарських культур.

Імпульсне дощування можна використовувати на ґрунтах будь-якої водопроникності, на ділянках зі складним рельєфом, при великих схилах і неправильній конфігурації поля, де використання інших видів зрошувальної техніки ускладнено або неможливо.

Вода при синхронному імпульсному дощуванні протягом усього вегетаційного періоду преривчасто порціями вибризується в повітря спеціальними дощувальними пристроями, що дає можливість підтримувати на оптимальному рівні вологість активного шару ґрунту і приземного повітря, зменшити капітальні витрати на

будівництво мережі напірних трубопроводів.

Імпульсні дощувальні системи поливу відрізняються від звичайних тим, що працюють в режимі переривчастого (імпульсного) подавання води на зрошувану поверхню поля.

Основні елементи такої системи: напіроутворюючий вузол (насосна станція), магістральний, розподільний та зрошувальні трубопроводи, імпульсні дощувальні апарати. Імпульсний дощувальний апарат («дощувальна гармата») відрізняється від звичайного тим, що його робочий цикл складається з двох періодів, що безперервно чергуються: періоду накопичення води в апараті та періоду виплеску (викиду) її під дією стисненого повітря.

При імпульсному дощуванні дальність польоту струменя набагато більше, ніж при безперервному витіканні. Це залежить від напору  $H_{max}$ , діаметра конічної насадки  $d$ , кута нахилу стовбура до горизонту, ємності гідравлічного акумулятора, тривалості пострілу.

**Застосування установок дрібнодисперсного дощування при пожежогасінні.** Огляд вітчизняних і зарубіжних матеріалів, що містять інформацію про розробку нової пожежної техніки, показує сталу тенденцію, що викликана потребами практики, щодо збільшення кількості засобів пожежогасіння, що доставляються на пожежу, підвищення їх продуктивності, ефективної дальності подавання струменя і потужності силової установки.

Аналіз значень параметрів, реалізованих за допомогою цих систем, показує наявність граничних значень продуктивності подачі (до 100 л/с) і дальності (60-80 м), обумовлених рядом факторів і, перш за все, обмеження потужності (300-350 кВт) енергетичної установки, пов'язаного, в свою чергу, з обмеженнями по габаритам і масі конструкції в цілому, а також обмеженнями, накладеними теорією динаміки гідравлічних турбулентних струменів.

Створення стаціонарних рідинних потоків з більш високими енергетичними параметрами в рамках класичних технічних засобів в даний час досить проблематичне. Більш раціонально вирішити цю задачу для нетривалого проміжку часу за допомогою імпульсного методу подачі рідини.

**Застосування установок дрібнодисперсного дощування у промисловості.** У сучасній гірничодобувній промисловості до 80% продукції добувається відкритим способом. Практично всі виробничі операції, що виконуються при розробці родовищ: вибухі роботи, буріння, розкопування (екскавація), транспортування гірничої маси, складування, супроводжуються значним утворенням пилу.



При цьому відбувається постійне вдосконалення систем розробки за рахунок інтенсифікації всіх виробничих процесів (від буріння свердловин і первинного дроблення в основному за допомогою вибухових робіт, до завантаження і транспортування гірничої маси), використання все більшої кількості високопродуктивних машин (бурових установок, екскаваторів), а також залізничного, автомобільного і конвеєрного транспорту.

Матеріали ряду досліджень дозволяють стверджувати, що в районі, де розташовані гірничодобувні підприємства, і особливо в районах, де розташовані техногенні масиви (відвали), в результаті масових викидів пилу в навколишнє середовище утворюється несприятлива екологічна ситуація, яка має тенденцію до подальшого погіршення, через збільшення виробничих потужностей, які не підкріплені ефективними заходами, спрямованими на зменшення викидів пилу.

Сучасний підхід до раціонального екологічно чистого природокористування вимагає відмови від багатьох традиційних підходів при складанні обґрунтувань застосування тих чи інших засобів і методів боротьби з пилом.

**Основна частина.** Для динамічних джерел запилення все більшого розповсюдження знаходять водяні гармати - туманоутворювачі (рис. 1).

Основним елементом таких систем є спеціальні водяні розприскувачі. Розприскувач являє собою гідравлічну форсунку з конусоподібною, яка звужується до виходу, формою каналу з мінімальним діаметром отвору 20 мкм і розміром водяних крапель, що утворюються, 10-15 мкм. Комплект обприскувачів з'єднаний трубопроводом у вигляді обруча в єдину гідравлічну систему з тиском подаваної води до 40 атм.



Рис. 1. Гармата-туманоутворювач

Обруч з обприскувачами встановлюється на

виході осевого вентилятора, вентилятор служить для перекачування водяного туману в зону пилоподавлення. Довжина струменя водяної гармати може досягати більше 50 м, при витраті води до 300 л/хв.

При взаємодії з мікрокраплями води частинки пилу зв'язуються за рахунок сил адгезії і міжмолекулярного тяжіння і осаджуються на землю. Вловлення пилу, що вітає в повітрі, диспергованою (дрібнороспиленою) рідиною протікає під впливом наступних механізмів:

- дифузійне вловлення пилових частинок в процесі осадження крапель води на землю через запилене повітря;

- коагуляція окремих зволжених пилових частинок у великі агрегати і їх швидке осадження на землю;

- конденсаційне вловлення пилових частинок краплями води з подальшим осадженням на землю.

Водяні гармати використовуються для профілактичного зволоження гірничої маси, що виділяє пил, у техногенних масивах і бортах кар'єру, при транспортуванні самоскидами, а також при проведенні вибухових робіт.

Однак досвід використання таких установок виявив ряд недоліків, які не дозволяють даному способу мати широке поширення в гірничодобувній промисловості, не кажучи вже про сільське господарство і пожежогасіння.

Більшу ефективність мають системи пилоподавлення туманом, які нейтралізують будь-який пил, що вітає, включаючи азбестовий і вугільний, такі системи дозволяють знизити концентрацію зваженого пилу в повітрі до 90 %.

Їх можна використовувати в кар'єрах, на шламових майданчиках, при демонтажі конструкцій, промислових вибухах, на цементних та металургійних комбінатах.

Пилоподавлення водяними й сніговими генераторами давно успішно використовується у всьому світі. Завдяки сильному напору дрібнодисперсної води і негативному заряду водяних частинок, хмара, що містить пил і газові шкідливості, осідає в місці її утворення, тим самим перешкоджаючи розповсюдженню шкідливих речовин в повітрі, наприклад, в їх переміщення в житлові райони.

Основним недоліком гармат-туманоутворювачів, є залежність дальності польоту дрібнодисперсного аерозолу від потужності вентилятора і наявності вітрового потоку, який може істотно скоротити діапазон поширення моросі. Другим недоліком такого устаткування є підвищена вимога до чистоти подаваної води (в кар'єрах і на виробництві використовують технічну воду). І

важливим недоліком установок туманоутворення є залежність від засобів підведення електрокомунікацій, без яких вони не можуть працювати.

Всіх цих недоліків позбавлена установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення «УСТІМОР» (рис. 2), розроблена і виготовлена в Кривому Розі. Вона була випробувана в 2021 році на хвостосховищі ПАТ «ІНГОК» [20].



Рис. 2. Установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення «Устімор»

Принцип роботи установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення заснований на імпульсному витискуванні води з водо-повітряного бака (посудини під тиском) установки продуктами згоряння паливно-повітряної суміші при високому тиску (більше 5 МПа).

Продукти згоряння утворюються у верхній частині водо-повітряного бака в «камері згоряння». Вони при своєму розширенні витісняють воду, розташовану в нижній частині водо-повітряного бака, через направляючу трубу, запірний орган, ствол і сопло в навколишнє середовище.

При вильоті струменя із сопла зі швидкістю до 100 м/с, примежова частина струменя води інтенсивно взаємодіє з повітряним середовищем, що призводить до імпульсивних коливань і розпаду водяного струменя на дрібні частинки води діаметром від 50 мкм до 800 мкм.

Було прийнято рішення про розробку і виготовлення установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення. Конструкція установки складалася з високонапірного водо-повітряного бака ємністю 800 дм<sup>3</sup>, встановленого на раму стандартного причепа. Розроблені системи подачі палива, запірні органи, клапани й системи приводів всіх механізмів управління установкою, встановлена незалежна система живлення, яка включала генератор, компресор і водяний насос. Організація дистанційного керування установкою стала можливою за допомогою модуля зв'язку,

який дозволяє керувати всіма операціями дистанційно з комп'ютера.

**Розрахунок основних параметрів імпульсних дощувальних струменів.** Виконаний оціночний розрахунок основних параметрів установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення для гідроакумулюючого бака об'ємом 0,8 м<sup>3</sup>. При цьому подача води для одного імпульсу становить 0,6 м<sup>3</sup>, початковий тиск газів в порожнині акумулюючого бака - близько 55 МПа, кінцева насадка діаметром 50 мм.

Спрощена схема розрахунку основних параметрів: витрати і дальності польоту струменя дощувального апарату наведена на рис. 3.

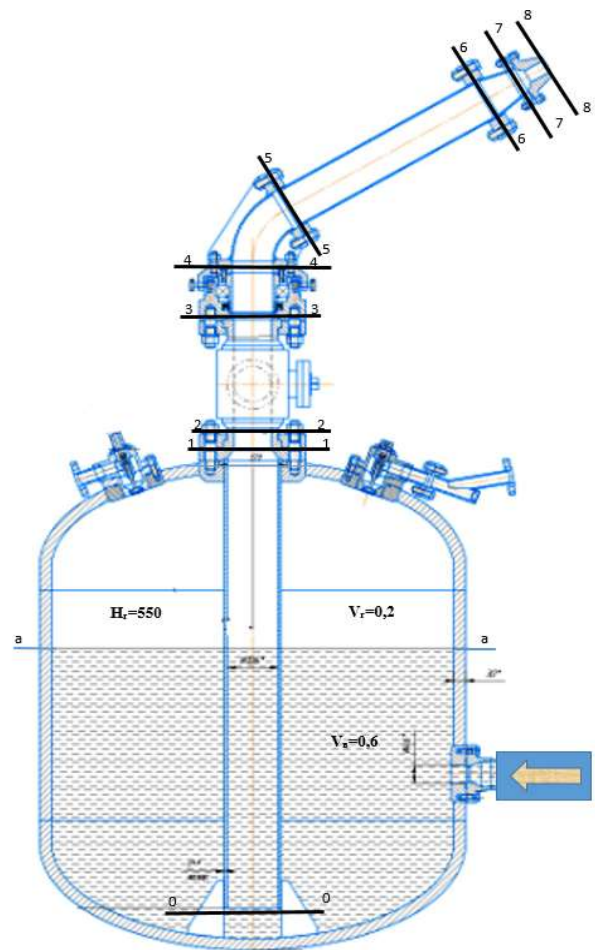


Рис. 3. Схема гідроаккумуляторного баку

Вихідні дані:

- початковий тиск газів –  $H_g^i = 550$  м;
- кінцевий тиск газів –  $H_g^k = 147$  м;
- об'єм води –  $V_w = 0,6$  м<sup>3</sup>;
- об'єм газів –  $V_g = 0,2$  м<sup>3</sup>;
- діаметр трубки –  $d_1 = 0,126$  м;
- діаметри проходу в повздовжніх перерізах 2-2 – 6-6 –  $d_2 = 0,10$  м;
- діаметр кінцевої насадки –  $d_8 = 0,05$  м;
- довжина труби в резервуарі –  $l_1 = 1,15$  м;
- довжина ділянки труби в повздовжніх

перерізах 2-2 – 6-6 –  $l_2 = 1,23$  м;  
 - довжина конічної ділянки стовбура –  $l_3 = 0,25$  м.

Використовуючи рівняння Бернуллі, формула розрахунку витрати води за один імпульс матиме вигляд:

$$Q = \omega \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \zeta_m + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH} \quad (1)$$

де  $\sum \zeta_m$  – сума коефіцієнтів місцевого опору:

$$\sum \zeta_m = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{кон}}^1 + \zeta_{\text{кут}} + \zeta_{\text{кон}}^2 + \zeta_{\text{кон}}^3 + \zeta_{\text{вих}} + \zeta_{\text{кран}}$$

де  $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$  – коефіцієнт місцевого опору на вході в трубу;

$\zeta_{\text{кон}}^1 = 0,05$  – коефіцієнт опору в конфузорі (поперечний переріз 1-1);

$\zeta_{\text{кут}} = 0,3$  – коефіцієнт місцевого опору при повороті труби;

$\zeta_{\text{кон}}^2 = 0,058$  – коефіцієнт місцевого опору в конфузорі (переріз 6-6);

$\zeta_{\text{кон}}^3 = 0,113$  – коефіцієнт місцевого опору в конфузорі (переріз 7-7);

$\zeta_{\text{вих}} = 1$  – коефіцієнт місцевого опору на виході (переріз 8-8);

$\zeta_{\text{кран}} = 1,5$  – коефіцієнт місцевого опору в кульовому крані (3-3 – 4-4).

Коефіцієнт місцевого опору довжині труби визначається з рівняння

$$\zeta_d = \lambda \frac{l}{d};$$

$$\sum \zeta_d = \zeta_{\text{дов}}^1 + \zeta_{\text{дов}}^2 + \zeta_{\text{дов}}^3$$

де  $\zeta_{\text{дов}}^1 = 0,18$  – коефіцієнт місцевого опору по довжині ділянки труби (1-1 – 2-2);

$\zeta_{\text{дов}}^2 = 0,25$  – коефіцієнт місцевого опору по довжині ділянки труби (2-2 – 6-6);

$\zeta_{\text{дов}}^3 = 0,113$  – коефіцієнт місцевого опору по довжині ділянки труби (6-6 – 7-7).

Розрахунки виконані з урахуванням того, що середнє значення тиску рідини на зрізі сопла буде визначатися як середнє арифметичне на початку і кінці виплеску і дорівнюватиме 3,5 МПа (350 м). Тоді значення витрати води через установку імпульсно дрібнодисперсного зрошення буде дорівнювати 0,054 м<sup>3</sup>/с.

На підставі отриманого значення витрати води, розраховується час одного циклу.

Час одного імпульсу, протягом якого відбувається повне викидання води з водонапірного баку складе:

$$t = 0,6 \text{ м}^3 : 0,054 \text{ м}^3/\text{с} = 11 \text{ с.}$$

Дальність польоту струменя обраховується по горизонталі і при  $H/d_0 > 800$  можна оціночно отримати за формулою Б. М. Лебедева:

$$L = \frac{H}{0,5 + 0,00025H/d_0} \quad (2)$$

Підставивши отримані значення напору  $H_{\text{сер}} = H = 350$  м, і діаметру насадки  $d_0 = 0,05$  м у формулу Лебедева, отримали теоретичне значення дальності струменя, рівне 155 м. Це значення є оціночним.

Під час випробувань установки виконано 6 циклів імпульсного викиду промислової води загальним об'ємом 3600 літрів. Повний цикл роботи установки склав в середньому 8 хвилин.

Час одного циклу викиду 600 л води становить 10 с. Дальнобійність установки в середньому становила 120 м - 130 м. Дрібнодисперсне розпилення спостерігалася по всій довжині польоту струменя. Площа зрошеної поверхні для одного циклу роботи установки «УСТІМОР» коливалася від 500 м<sup>2</sup> до 750 м<sup>2</sup> (рис. 4).



Рис. 4. Довжина струменя установки «Устімор»

Фотографії процесу розпаду струменя наведено на рис. 5 і 6.



Рис. 5. Процес розпаду струменя (фото 1)





Рис. 6. Розподіл розпаду струменя (фото 2)

Підтверджено автономну роботу агрегату: автоматичне подавання води, повітря, палива, відкриття і закриття керуючих клапанів і кульових кранів, загоряння паливної суміші, викид диспергової рідини і початок нового циклу роботи установки відбувалось за заданою програмою.

Підтверджено працездатність установки з дистанційним керуванням через систему SCADA: через WI-FI, з ноутбука на відстані 100 - 200 метрів або, використовуючи інтернет, з комп'ютера. Інтенсивність зрошення за один цикл викиду води становила в середньому  $0,85 \text{ л/м}^2$ .

Дослідженнями встановлено [2,3,4], що під час дощування рух води в установці «Устімор» з моменту відкриття затвору до моменту досягнення у насадку максимальної швидкості є прискореним, а потім – сповільненим.

При прискореному русі води в установці втрати питомої енергії на подолання місцевих сил інерції становлять 50% і більше від загальних втрат питомої енергії, а при сповільненому русі вони практично відсутні.

Отже, отримати одну розраховану залежність, яка б достатньо точно описувала процес викиду води з гідроаккумулятора апарату є досить складною задачею.

**Висновки.** Рекомендувати до використання в якості засобу для нанесення рідин способом дрібнодисперсного зрошення (води, технічної води, технічної води з додаванням поверхнево-активних речовин тощо) для зволоження і пилоподавлення на відкритих майданчиках (хвостосховищах, відкосах відвалів і для очищення повітряної атмосфери кар'єрів).

Параметри роботи установки можуть бути різними, в залежності від поставлених цілей і завдань: наприклад, при об'ємі викиду води в 500 кг відбувається зрошення поверхні дрібнодисперсним аерозолем у вигляді моросі, що осідає (рис. 7).



Рис. 7. Зовнішній вигляд установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення «Устімор»

При цьому дальність польоту струменя становить до 120 - 180 м. Сектор зрошення регулюється по програмі. Викид води відбувається за 10-12 с. Повний цикл від заправки водою до викиду відбувається за 1-5 хв, в залежності від поставленої задачі і потужності підвідних комунікацій. За одну годину роботи установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення може викидати в атмосферу у вигляді моросі від 5 до 30 тон води.

Для закріплення поверхонь, що виділяють пил, у воду додаються поверхнево-активні добавки, які зв'язують пилоутворюючу поверхню, запобігаючи процесу запилення. Також зрошуючи запилені території, краплі води вимивають частинки пилу з атмосфери, покращуючи якість повітряного середовища.

Це призводить до значного локального покращання якості повітряного середовища в зоні експлуатації установки, що знижує інтенсивність поширення шкідливих викидів і пилу як з пилоутворюючих поверхонь так і з джерел неорганізованих викидів, які виникають при вивантаженні великих обсягів відходів і в пунктах перевантаження.

Одним із шляхів вирішення проблеми нормалізації атмосфери робочих зон глибоких кар'єрів є використання дрібнодисперсного аерозолю як тепло-масообмінного реагенту для штучного процесу вентиляції застійних зон.

Розрахунково-аналітичними й експериментальними дослідженнями встановлено, що для інтенсифікації повітрообміну в кар'єрі ПАТ «ІнГЗК» доцільно використовувати установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення, використовуючи подвійний ефект: провітрювання газованих робочих зон і очищення їх від шкідливих речовин за допомогою дрібнодисперсного аерозолю, що вільно вітає у просторі.

Установка імпульсного дрібнодисперсного

зрошення також може бути використана для подавлення пилу, що взмітається і вітає й закріплення поверхонь, що пилюють, на хвостосховищах, складах сипучих матеріалів, відвалах, технологічних автошляхах.

Установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення може бути використана для дрібнодисперсного дощування полів, насаджень, садів, виноградників.

Зрошення листяного покриття і поверхні гру-

нту знижує їх температуру на 7 і 10 °С відповідно на сонці і на 6 і 6,6 °С - в тіні.

Відносна вологість повітря в приземному шарі при зрошенні дрібнодисперсним дощуванням з циклом 600 літрів води за 5-5,5 хвилин істотно змінюється навіть при відчутному повітрообміні (швидкість вітру біля 2 м/с), її значення збільшується в точці приземного шару в середньому на 15 %, а в точці на відстані 1,1 метра над поверхнею землі - на 20-25 %.

## References

1. Bulva A.D. Zastosuvannia vodianoї zavisy dlia obmezhenia poshyrennia nebezpechnykh domishok v atmosferi. – Pozhezhvybukhobezpeka. T 22, №9, 2013. – S.74-83.
2. Nalyvaiko V.H. , Konovaliuk V.A. Rozrobka efektyvnykh sposobiv i zasobiv normalizatsii atmosfery robochykh zon karieriv / Naukovo-tekhichniy zbirnyk «Ventyliatsiia, osvittleniia i teplohozopostachannia» teplohozopostachannia: nauk.-tekh. zb. / Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury. – 2020.– Vyp. 34.- S. 33-43.
3. Pidsumkoviy zvit № 2079-34 vid 12.03.2012 r. «Rozrobka metodiv i zasobiv normalizatsii atmosfery robochykh zon karieru PAT «INHOK» u zviazku z prosuvanniam hirnychodobuvnykh robit na pivnichnomu napriamku».
4. Protokol vyprobuvan impulsno-dyspersnoho zroshvalnoho ahrehatu «Ustimor» na khvostoskhovyshchi PAT «Inhuletskyi hirnycho-zbahachovalnyi kombinat».- vid 01.06.2021.- P.1-2.

**UDC (622.807:622.235.3)**

## Development of a multifunctional installation of fine dispersed irrigation

V. Nalyvaiko<sup>1</sup>, V. Konovaliuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, vadim.moris@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4452-6111

<sup>2</sup>PhD, associate professor. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. konovaliuk.va@knuba.edu.ua ORCID: 0000-0001-5115-7188

*Abstract. The intensification of the processes of mining and processing of mineral raw materials, characteristic of the modern development of mining production, is associated with significant pollution of the atmospheric air. As an economical and mobile means of dust suppression, it is recommended to use the developed impulse fine-dispersed irrigation system "Ustimor". The principle of operation of the installation is based on the pulsed displacement of water from the water-air tank by the combustion products of the fuel-air mixture under high pressure (>5 MPa). Experimental and industrial tests of the installation were carried out at the tailings storage facility of PJSC "Ingulets Mining and Processing Plant". The range of the installation is on average 120-130 m. The area of the irrigated surface in one cycle of operation is from 500 m<sup>2</sup> to 750 m<sup>2</sup>. Fine spraying was observed along the entire length of the jet flight. In one hour of operation, the installation can release from 5 to 30 tons of water into the atmosphere in the form of drizzle. The intensity of watering for one work cycle is on average 0.85 l/m<sup>2</sup>. The possibility of autonomous operation of the installation and its remote control through the SCADA system has been confirmed. The installation of pulse fine-dispersed irrigation is recommended for use as a means of spraying liquid by the method of fine-dispersed irrigation on open areas of surfaces where dust is intensively swept and suspended. It can be used for dust suppression and humidification at tailings storage facilities, warehouses of bulk materials, landfills, technological highways. The "Ustimor" installation can also be used for fine-dispersed irrigation of plantations, vineyards, gardens, etc. Irrigation of leaf cover and soil surface will lower their temperature by 7 - 10 °C in the sun and by 6 - 6.6 °C in the shade.*

*Keywords: dust suppression, fine sprinkler irrigation, multifunctional installation*

Надійшла до редакції / Received 30.03.2023

## УДК 67.01

# Розвиток енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні

Ілля Девтеров<sup>1</sup>, Петро Зінич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>д.філос.н., доц. Інститут інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, devterov@i.ua, ORCID: 0000-0001-7816-0774

<sup>2</sup>к.т.н., доц., завідувач кафедри цивільної інженерії Інституту інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, mpzinych@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8991-476

*Анотація. У роботі на основі системного підходу, аналізу та синтезу важливих питань за темою дослідження, а також методу спостереження, вимірювання, формалізації і узагальнення досліджується сучасний стан енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні та ресурси, які можна розвивати та використовувати для підвищення енергоефективності та енергонезалежності країни в умовах глобалізації світової економіки, а також інтеграції систем штучного інтелекту і нейромереж у всі сфери життя. Проводиться дослідження подальших шляхів підвищення та оптимізації енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні, доводиться їх можливість. Робиться висновок про те, що розуміння важливості цих питань призведе до енергонезалежності і енергобезпеки країни в цілому, а також зростання обсягів громадянського будівництва і енергореновації цивільних будівель. Особливу увагу приділено ВДЕ, що вже використовуються в Україні, є доволі енергоефективними і зберігають навколишнє середовище, що підвищує конкурентоспроможність країни на світовому ринку енергопостачання, а також виробництва багатьох товарів та послуг, актуальних на сьогоднішній день.*

*Ключові слова: енергозабезпечення, цивільна інженерія, енергоресурси, енергетична безпека, інфраструктура, відновлювальні джерела енергії.*

**Вступ.** Наразі енергозабезпечення України можна охарактеризувати як достатнє, але залежне від імпорту енергоресурсів. Україна виробляє значну частину своєї електроенергії на вугільних і ядерних електростанціях, а також має потужності для виробництва вітрової та сонячної енергії. Однак, частка імпорту енергоресурсів, зокрема газу, є значною. Також в Україні є проблеми з застарілими системами передачі та розподілу електроенергії, що може призвести до аварій та відключення електропостачання. Вивчення цих питань є нагально потрібним, що ми можемо побачити у нашій роботі.

**Актуальність дослідження.** Актуальність дослідження полягає у прагненні України до енергонезалежності та енергоефективності систем, що існують, модернізації систем енергозабезпечення, які вже є застарілими і мають низьку ефективність і ККД.

**Останні дослідження та публікації.** Останні 5 років ці теми щільно досліджувалися такими авторами, як Бурлаков В. М. [2], Кизим М.О [4], Зернецька О.В. Кузнецов М.П. і Мельник О.А досліджували комплексне використання відновлюваних джерел енергії [5], Шостак Л. звернула увагу на проблеми енергозабезпечення розвитку України [8], Енергетичну стійкість досліджував Chris Hendricson у MellonUniversity, Pittsburgh [9], і у Witingsschool & Engineering/ Department of Civil & Systems Engineering (JohnsHopkins) [10] розглянуто май-

бутнє енергетичної інфраструктури; роль системної інженерії в енергетичній промисловості досліджувала Maria Peres [11]. Багато робіт пов'язано із енергонебезпекою, удосконаленням інфраструктури і нових конструктивних рішень, пов'язаних з цим процесом. Тобто ми бачимо, що енергоефективність є проблемою у кожній країні і є предметом зацікавленості профільних спеціалістів.

**Формулювання цілей статті.** Мета роботи полягає у дослідженні стану енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні та ресурсів, які можна розвивати та використовувати для підвищення енергоефективності та енергонезалежності країни в умовах глобалізації світової економіки, а також інтеграції систем штучного інтелекту і нейромереж у всі сфери життя; дослідження шляхів підвищення та оптимізації енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні.

**Основна частина.** У системах цивільної інженерії України існують наступні проблеми у енергопостачанні:

1. Застарілість енергетичної інфраструктури – багато електромереж і трансформаторних підстанцій є застарілими і потребують заміни або модернізації.

2. Низька ефективність використання енергоресурсів – багато будівель і споруд мають застарілі системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, що призводить до витрат енергії.

3. Недостатня розвиненість відновлювальних джерел енергії - в Україні недостатньо розвинуті вітрова і сонячна енергетика, що може забезпечити більш екологічне та стабільне енергопостачання.

4. Низький рівень автоматизації та дистанційного керування – багато енергетичних об'єктів не мають сучасних систем автоматизації та дистанційного керування, що призводить до збільшення ризику аварій та зниження ефективності роботи систем.

5. Недостатня забезпеченість енергетичної безпеки – Україна залежить від імпорту енергоресурсів, що може призвести до проблем з енергетичною безпекою в разі геополітичних криз або зміни цін на енергоресурси.

6. Цільове руйнування електричних станцій та інших енергетичних об'єктів інфраструктури агресором, методичні обстріли саме критичних об'єктів інфраструктури, замінування АЕС [2].

З табл. 1 ми бачимо, що цільове призначення і характер використання різних джерел енергії в Україні практично не відрізняється від провідних країн світу. При цьому, Україна може позбавитися, наприклад, імпорту енергоресурсів шляхом:

- Розвитку вітрової та сонячної енергетики. Україна має потенціал для виробництва енергії з вітру та сонця, що може зменшити залежність від імпорту газу та нафти;

- Розвитку енергоефективності. Україна може зменшити споживання енергії шляхом впровадження енергоефективних технологій та будівництва енергоефективних будинків;

- розвитку відновлювальних джерел енергії. Україна може використовувати відновлювальні джерела енергії, такі як біомаса, геотермальна енергія, гідроенергетика та інші;

- розвитку альтернативних джерел енергії. Україна може використовувати альтернативні джерела енергії, такі як воднева енергія, ядерна енергія, акумуляторні батареї та інші;

- розвитку місцевої енергетики. Україна може розвивати місцеву енергетику, зокрема використовуючи енергію відходів та біогазу;

- цільового та економного використання власних енергозапасів [6].

Для підвищення ефективності використання енергоресурсів в системах цивільної інженерії України можна вжити наступні заходи: 1) Використання енергоефективних технологій та матеріалів. Це може включати в себе установку ізоляції, використання LED освітлення, ефективних систем опалення та кондиціонування повітря, а також використання енергоефективних

матеріалів для будівництва; 2) Впровадження систем енергоменеджменту. Це може включати в себе моніторинг та аналіз споживання енергії, виявлення та усунення проблем, пов'язаних з енергоспоживанням, та встановлення цілей для зниження споживання енергії; 3) Використання відновлювальних джерел енергії. Це може включати в себе використання сонячних батарей, вітрових турбін, гідроенергетики та інших джерел енергії, які можуть замінити традиційні джерела енергії; 4) Дуже актуальним для України на сьогоднішній день є енергія з використанням природного газу, біогазу, викопного вугілля і енергії надр Землі, в тому числі, енергії викидного вентиляційного повітря [4]; 5) Використання систем автоматизації та управління. Це може включати в себе використання систем автоматичного управління освітленням, опаленням та кондиціонуванням повітря, що дозволяє ефективно використовувати енергію та знижувати її споживання; 6) Впровадження енергетичних стандартів. Це може включати в себе встановлення стандартів енергоефективності для будівель та обладнання, що дозволяє знижувати споживання енергії та забезпечувати більш стійку енергетичну систему.

У енергообладнанні систем цивільної інженерії можуть використовуватися різні матеріали, які сприяють енергозбереженню. Основні з них:

1. Теплоізоляційні матеріали. Вони зменшують втрати тепла через стіни, дахи, підлоги і т.д. Найпоширеніші матеріали цього типу - мінеральна вата, пінополістирол, пінополіуретан.

2. Енергозберігаючі вікна і двері. Вони мають високу теплоізоляцію і дозволяють зменшити витрати на опалення і кондиціонування повітря.

3. Світлопрозорі конструкції з енергозберігаючим склом. Вони дозволяють пропускати більше світла, зменшуючи при цьому неминучий вплив сонячної радіації на внутрішній клімат приміщення.

4. Енергозберігаючі матеріали для дахів і покрівель. Вони зменшують втрати тепла через дах і дозволяють суттєво знизити витрати на опалення.

5. Системи автоматичного регулювання температури та освітлення. Вони дозволяють зменшити витрати на опалення і кондиціонування повітря, регулюючи температуру та освітлення в залежності від погодних умов і часу.

Використання цих матеріалів може значно знизити витрати на енергопостачання і зменшити негативний вплив на довкілля.

Порівняльна таблиця використання відходів та ВДЕ в енергетичному постачанні України, Німеччини, Великої Британії і Франції

№	Вид відходів	Використання в енергетиці України	Використання в енергетиці Німеччини	Використання в енергетиці Великої Британії	Використання в енергетиці Франції
1	2	3	4	5	6
1.	Вугілля	для виробництва електроенергії в теплових електростанціях	для виробництва електроенергії в теплових електростанціях та когенераційних установках	для виробництва електроенергії та опалення	для виробництва електроенергії та опалення
2.	Нафта	для виробництва електроенергії в теплових електростанціях та для виробництва палива для автомобілів та інших транспортних засобів	для виробництва електроенергії в теплових електростанціях та для виробництва палива для транспорту	для виробництва палива для транспорту та побутових потреб	для виробництва палива для транспорту та побутових потреб
3.	Природний газ	для виробництва електроенергії в газових та комбінованих циклах електростанцій, а також для опалення та побутових потреб	для виробництва електроенергії в газових та комбінованих циклах електростанцій, а також для опалення та побутових потреб	для виробництва електроенергії в газових та комбінованих циклах електростанцій, а також для опалення та побутових потреб	для виробництва електроенергії в газових та комбінованих циклах електростанцій, а також для опалення та побутових потреб
4	Біомаса	для виробництва електроенергії в біопаливних електростанціях та як джерело тепла для опалення	для виробництва електроенергії в біопаливних електростанціях та як джерело тепла для опалення	для виробництва електроенергії в біопаливних електростанціях та як джерело тепла для опалення	для виробництва електроенергії в біопаливних електростанціях та як джерело тепла для опалення
5	Сонячні панелі	для виробництва електроенергії з сонячної енергії	для виробництва електроенергії з сонячної енергії	для виробництва електроенергії з сонячної енергії	для виробництва електроенергії з сонячної енергії
6	Вітрові турбини	для виробництва електроенергії з вітрової енергії	для виробництва електроенергії з вітрової енергії	для виробництва електроенергії з вітрової енергії	для виробництва електроенергії з вітрової енергії
7	Гідроелектростанції	для виробництва електроенергії з енергії потоків води	для виробництва електроенергії з енергії потоків води	для виробництва електроенергії з енергії потоків води	для виробництва електроенергії з енергії потоків води

Провідні фахівці у сфері цивільної інженерії та енергетики вважають розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) одним із найважливіших шляхів до енергонезалежності України та розвитку систем цивільної інженерії, потреби яких зростають разом із будівництвом нових об'єктів-споживачів. «Успіх на цьому шляху визначається загальним станом і тенденціями соціально-економічного розвитку України, які зумовлюють можливість не тільки простого, а й розширеного відтворення. Ключова роль енергоресурсів у забезпеченні цих процесів змусила

постіндустріальні країни переорієнтувати пріоритети свого розвитку на початку ХХІ ст. з обмеження використання невідновлювальних природних енергоносіїв на інтенсифікацію їх використання через зниження енергоємності випуску та використання альтернативних джерел енергопостачання» [5].

Енергоефективність відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) залежить від типу використовуваної технології та умов експлуатації. Наприклад, сонячні батареї мають енергоефективність близько 15-20%, тобто вони можуть перетворити 15-20% сонячної енергії в електричну енергію.



Вітрові турбіни мають енергоефективність від 30% до 50%, залежно від розміру та типу турбіни. Гідроенергетичні установки можуть мати енергоефективність більше 90%, що робить їх одними з найбільш ефективних ВДЕ, але при цьому ми розуміємо величезну витратність подібних проектів.

Варто зазначити, що енергоефективність ВДЕ може бути вплинута різними факторами, такими як погодні умови, технічний стан обладнання та інші. Також важливо враховувати витрати на виробництво, транспортування та установку ВДЕ, а також витрати на зберігання та транспортування енергії, яку вони виробляють. Утилізація акумуляторних батарей, що відрізняються своєю складною проблемою.

На підприємствах біогаз звичайно використовується як паливо в котлах для виробництва теплової енергії, в когенераційних машинах - для виробництва електроенергії та супутньої теплової [2]. 1 куб.м. біогазу дає 2-2,5 кВт/год електроенергії та 2,5-3 кВт/год теплової енергії за рахунок охолодження двигунів при спалюванні біогазу. Також переробка в біометан – важлива потенційна складова використання біогазу. Використовується як автомобільне паливо або закачується до центральної газової мережі, а також є сировиною для органічного синтезу в хімічній промисловості, наприклад, спиртів - метанолу, етанолу, бутанолу тощо. Супутнім ко-продуктом виробництва біогазу є зріджений газ CO<sub>2</sub>[2], для підвищення ефективності використання вуглекислого газу розробляються нові енергетичні технології, в яких вуглекислий газ є основним робочим тілом в термодинамічних циклах енергетичних установок замість продуктів згоряння, водяної пари та води.

Загалом, ВДЕ є енергоефективними технологіями, які можуть забезпечити значну кількість енергії при мінімальних викидах в атмосферу та зменшенні залежності від традиційних джерел енергії.

Кількість використання біогазу в різних галузях промисловості може змінюватися в залежності від регіону та економічних умов. Проте, нижче наведено загальні кількісні показники використання біогазу в різних галузях промисловості.

Також, процент електроенергії, який можна заощадити шляхом використання систем автоматичного управління (САУ), залежить від типу системи та її ефективності. Проте, в цілому, використання САУ може зменшити споживання електроенергії в системах цивільної інженерії на 10-30 %.

Таблиця 2.

№	Галузь промисловості	Кількість використання біогазу
1	Електроенергетика	40%
2	Теплопостачання	30%
3	Транспорт	15%
4	Хімічна промисловість	10%
5	Інші галузі	5%

**Примітки.** Як ми бачимо, домінуюче споживання біогазу приходить на електроенергетику і теплопостачання, що дає нам можливість підвищити ці показники, які вплинуть на енергоефективність промисловості і систем цивільної інженерії також.

Наприклад, використання САУ для управління освітленням може знизити споживання електроенергії на 20-50 %, залежно від типу та ефективності використовуваної технології. Використання САУ для управління системами опалення та кондиціонування повітря може знизити споживання електроенергії на 10-30 % [3], при належній формалізації цих процесів.

Важливо враховувати, що ефективність САУ залежить від правильної настройки та підтримки системи. Також варто враховувати витрати на встановлення та підтримку САУ, які можуть бути виправданими за рахунок зниження споживання електроенергії та зменшення витрат на енергію.

Загалом, використання САУ є ефективним способом зниження споживання електроенергії в системах цивільної інженерії, що дозволяє забезпечувати більш стійку та економічну енергетичну систему. Кількість електроенергії, яку можна заощадити шляхом впровадження енергетичних стандартів, залежить від типу стандарту та відповідності його вимог наявним системам цивільної інженерії. Проте, в цілому, впровадження енергетичних стандартів може знизити споживання електроенергії в системах цивільної інженерії на 20-40 %.

Наприклад, використання стандарту LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) може знизити споживання електроенергії на 20-30 % в порівнянні з традиційними будівлями. Використання стандарту BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) може знизити споживання електроенергії на 25-40 % в порівнянні з традиційними будівлями.

Важливо враховувати, що впровадження ене-

енергетичних стандартів може вимагати відповідних змін в будівельному проекті та виконанні будівельних робіт, що може збільшити вартість будівництва [8]. Проте, ці зміни можуть бути виправданими за рахунок зниження споживання електроенергії та зменшення витрат на енергію.

Загалом, впровадження енергетичних стандартів є ефективним способом зниження споживання електроенергії в системах цивільної інженерії, що дозволяє забезпечувати більш стійку та економічну енергетичну систему, тому що стандарти розроблялися провідними спеціалістами у цієї галузі.

Процент електроенергії, який можна заощадити шляхом впровадження систем енергоменеджменту (СЕМ), залежить від типу системи та її ефективності. Проте, в цілому, використання СЕМ може знизити споживання електроенергії в системах цивільної інженерії на 10-30 %.

Наприклад, використання СЕМ для моніторингу та аналізу споживання енергії може знизити споживання електроенергії на 10-20%. Використання СЕМ для виявлення та усунення проблем, пов'язаних з енергоспоживанням, може знизити споживання електроенергії на 20-30%, що є вже досить серйозним відсотком енергозбереження.

Важливо враховувати, що ефективність СЕМ залежить від правильної настройки та підтримки системи [8]. Також варто враховувати витрати на встановлення та підтримку СЕМ, які можуть бути виправданими за рахунок зниження споживання електроенергії та зменшення витрат на енергію. Загалом, використання СЕМ є ефективним способом зниження споживання електроенергії в системах цивільної інженерії, що дозволяє забезпечувати більш стійку та економічну енергетичну систему.

Також, можна змінити ефективність енерго-

забезпечення систем цивільної інженерії законодавчим шляхом. Наприклад, шляхом прийняття законів та нормативних актів, що встановлюють вимоги до енергоефективності будівель та споруд, використання енергоефективних технологій та матеріалів, встановлення обмежень на використання енергозатратних технологій та устаткування. Також можуть бути введені фінансові стимули для будівництва енергоефективних будівель та споруд, наприклад, знижки на податки або кредити зі зниженими процентними ставками.

**Висновки.** З проведеного дослідження можна зробити висновки про те, що можливості підвищення та оптимізації енергозабезпечення систем цивільної інженерії в Україні є. Розуміння важливості цих питань призведе до енергонезалежності і енергобезпеки країни в цілому, а також зростання обсягів громадянського будівництва і енергorenovaції цивільних будівель [8] та відновлення української інфраструктури після перемоги у війні, яка все більше виснажує економіку. Особливу увагу слід приділяти ВДЕ, що є доволі енергоефективними і зберігають навколишнє середовище. Технології виробництва ВДЕ вже налагоджені і існують у нас, в Україні.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальший розвиток цієї роботи полягає у адресному моніторингу проблемних ланок сучасної системи енергозабезпечення та втіленню у життя новітніх розробок вітчизняних та зарубіжних фахівців, які вже є на сьогоднішній день і дозволяють суттєво знизити процент енерговитрат на всіх ділянках енергозабезпечення систем цивільної інженерії [5-7, 11-14]. Це підвищує конкурентоспроможність країни на світовому ринку енергопостачання, а також виробництва багатьох товарів та послуг, актуальних на сьогоднішній день.

## References

1. Biohazovi zavody: Praktyka zastosuvannya. Napryamky vykorystannya biohazu. Rezhym dostupu: <https://utc.bio/biogazovi-kompleksy/napryamky-vykorystannya-biogazu/>
2. Burlakov V. M. Synerhiya ta tempodynamika vdoskonalennya modeli kibernetychnykh zahroz yadernykh ob'yektiv / V. M. Burlakov, V. H. Kononovych, I. V. Kononovych // Adapt. systemy avtomat. upr. – 2018. – № 1. – S. 23–36. – Bibliohr.: 22 nazv.
3. Dudnyk O.M., Dunayevs'ka N.I., Sokolovs'ka I.S., Trypol's'kyy A.I., Stryzhak P.E.. Oderzhannya, ochyshchennya ta utylizatsiya vuhlekysloho hazu v protsesakh vyrobnytstva enerhiyi ta khimichnykh produktiv // Instytut vuhil'nykh enerhotekhnolohiy NAN Ukrayiny, Kyuyiv, Instytut fizychnoyi khimiyi im. L.V. Pysarzhevs'koho NAN Ukrayiny, Kyuyiv, UDK 620.9:662.7:662.6:544.478, 2022.
4. Kyzym M. O. Ekonomichna bezpeka Ukrayiny u hazoviy sferi: monohrafiya / M.O. Kyzym, O.V. Lelyuk. – Kharkiv : INZHEK, 2014.– 224 c. – Bibliohr.: s.184–204.
5. Kompleksne vykorystannya vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi: Kurs leksiy [Elektronnyy resurs] : navch. posib. dlya stud. spetsial'nosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika» / KPI im. Ihorya Sikors'koho ; ukklad.: M.P. Kuznyetsov, O.A. Mel'nyk – Elektronni tekstovi dani (1 fayl: 7,93 Mbayt). – Kyuyiv : KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2022. – 304 s.

6. Modernizatsiya i bezpeka rozvytku v umovakh hlobalizatsiyi : zb. nauk. pr. / red.: O. V. Zernets'ka ; NAN Ukrainy, In-t vsesvit. istoriyi. – Kyiv, 2016. – 194 s.
7. Shyshkin E. A. Enerhorenovatsiya tsyvil'nykh budivel' : konspekt lektsiy dlya studentiv dennoyi ta zaochnoyi form haluzi znan' 19 – Arkhitektura ta budivnytstvo, spetsial'nosti 192 – Budivnytstvo ta tsyvil'na inzheneriya / E. A. Shyshkin, K. I. Vyatkin ; Kharkiv. nats. un-t mis'k. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv : KHNUMH im. O. M. Beketova, 2018. – 30 s.
8. Shostak L. Problemy enerhozabezpechennya rozvytku Ukrainy. // PERSONAL. Zhurnal intelektual'noyi elity. № 11/2007. Rezhym dostupu: <http://personal.in.ua/article.php?id=611>
9. Chris Hendricson, Dist. M. Asce/ Sustainable Energy Challenges for Civil Engineering Management // Dept. of Civil and Environmental Engineering/ Carnegie Mellon Univ, Pittsburgh, PA 15208/ DOI 10.1061/(ASCE)ME. 1943-5479.0000074/ Rezhym dostupu: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000074>
10. Drivers for implementation of energy-efficient technologies in building construction projects — Results from a Swedish case study. Jakob Carlander, Patrik Thollander // Scince Direct. Resources, Environment and Sustainability. Volume 10, December 2022, 100078. Rezhym dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666916122000287>
11. Evaluating energy economic security and its influencing factors in China. Jiangquan Wang, Muhammad Shahbaz, Malin Song // Elsevier. Science Direct/ Energy Volume 229, 15 August 2021, 120638. Rezhym dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221008872>
12. Future Energy Infrastructure/ Johns Hopkins/ Witing school & Engineering/ Department of Civil & Systems Engineering/ 2022. Rezhym dostupu: <https://engineering.jhu.edu/case/research/grand-societal-challenges/future-energy-infrastructure/>
13. Maria Peres. System Engineering's Role in the Energy Industry // Valispase, 24.01.2023. Rezhym dostupu: <https://www.valispase.com/system-engineerings-energy-industry/>
14. Siyi Wang. Analysis of Construction Technology Improvements based on the Energy Saving Requirements // Xi'an Siyuan University, Xi'an, Shaanxi, China, 710038.

## UDC 67.01

### Development of energy supply civil engineering system in Ukraine

Illja Devterov<sup>1</sup>, Petro Zinych<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, associate professor. Institute of Innovative Education of Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [devterov@i.ua](mailto:devterov@i.ua), ORCID: 0000-0001-7816-0774

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Head of the Department of Civil Engineering of Institute of Innovative Education of Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [mpzinych@ukr.net](mailto:mpzinych@ukr.net), ORCID: 0000-0002-8991-476

*Abstract. The current state of energy supply of civil engineering systems in Ukraine and resources that can be developed and used to increase energy efficiency and energy independence are investigated in the work based on a systemic approach, analysis and synthesis of important questions on the research topic, as well as the method of observation, measurement, formalization and generalization countries in the conditions of the globalization of the world economy, as well as the integration of artificial intelligence systems and neural networks in all spheres of life. The relevance of the research lies in Ukraine's desire for energy independence and energy efficiency of existing systems, modernization of energy supply systems, which are already outdated and have low efficiency and efficiency. Further ways of improving and optimizing the energy supply of civil engineering systems in Ukraine are being researched, and their feasibility is proven. It is concluded that understanding the importance of these issues will lead to energy independence and energy security of the country as a whole, as well as an increase in the volume of civil construction and energy renovation of civil buildings. Special attention is paid to RES, which are already used in Ukraine, are quite energy-efficient and preserve the environment, which increases the country's competitiveness in the world energy supply market, as well as the production of many goods and services that are relevant today. Leading experts in the field of civil engineering and energy consider the development of renewable energy sources (RES) as one of the most important ways to energy independence of Ukraine and the development of civil engineering systems, the needs of which are growing along with the construction of new consumer facilities. The further development of this work consists in the targeted monitoring of problematic links of the modern energy supply system and the implementation of the latest developments of domestic and foreign specialists, which are already available today and allow to significantly reduce the percentage of energy costs in all areas of energy supply stem of civil engineering.*

*Keywords: energy supply, civil engineering, energy resources, energy security, infrastructure, renewable energy sources.*

Надійшла до редакції / Received 03.04.2023

УДК 621.311.22

## Сучасні системи тепло- та паропостачання промислових підприємств при застосуванні глибокої утилізації енергетичного потенціалу технологічної пари

О. Г. Погосов<sup>1</sup>, Н. В. Чепурна<sup>2</sup>, П. О. Пасічник<sup>3</sup>, Є. О. Кулінко<sup>4</sup>, А. А. Дорошенко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. КНУБА, м. Київ, Україна, pogosov\_aleksandr@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2158-8897

<sup>2</sup>к.т.н., доц. КНУБА, м. Київ, Україна, chepurayanv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8044-7563

<sup>3</sup>к.т.н., доц. КНУБА, м. Київ, Україна, pasichnik.pavlo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8499-6949

<sup>4</sup>асист., КНУБА, м. Київ, Україна, yevhen\_kulinko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8834-3600

<sup>5</sup> директор ТОВ «Комплексне проектування та будівництво», м. Київ, Україна

*Анотація.* Системи промислового паропостачання як різновид систем теплопостачання є великим споживачем первинної енергії. За рахунок специфічності термодинамічних парових процесів ці системи на практиці мають значущі невикористовувані потенціали вторинних енергетичних ресурсів. Сучасні системи паропостачання повинні будуватись на підставі оцінки їх ексергетичного коефіцієнта корисної дії. В статті показано модернізовані теплові схеми систем паропостачання, для яких можливе досягнення додаткової електричної потужності на рівні 135-250 кВт/(кг/с) при роботі пристроїв з відносним внутрішнім коефіцієнтом корисної дії до 60-70%. В комплексі зі збільшенням відсотку повернення конденсату та утилізацією вторинних енергетичних ресурсів, підвищення енергетичного ККД системи становить 2-4%, а абсолютне значення ексергетичної ефективності – 16...22 % з урахуванням ексергетичної ефективності котлоагрегату.

*Ключові слова:* промислова енергетика, паропостачання, парова турбіна, ексергія, ексергетичний ККД.

**Вступ.** Системи паропостачання промислових підприємств, як різновид систем теплопостачання, є великим споживачем первинної енергії в загальнонаціональних енергобалансах. В свою чергу за рахунок специфічності термодинамічних парових процесів системи паропостачання промислових підприємств на практиці мають значущі невикористовувані потенціали вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР). Сучасні системи паропостачання повинні будуватись винятково з оцінюванням їх ексергетичного ККД, що дасть змогу оцінювати ефективність таких систем валово у всіх елементах життєвого циклу проекту: енергетичному, економічному, екологічному та навіть соціальному.

**Актуальність дослідження.** В сучасному світі, коли системи теплопостачання розвиваються по шляху низькотемпературних джерел енергії та відповідних споживачів, системи паропостачання промислових підприємств з огляду на очевидні технологічні особливості залишаються високотемпературними. В свою чергу очевидним є низька ексергетична ефективність систем з значно віддаленими температурними рівнями джерела та споживача. Тому для таких систем вкрай актуальним є дослідження впливу відборів ВЕР на ексергетичну ефективність підприємств.

**Основна частина.** Для побудови енергоефективних системи паропостачання промислових були застосовані наступні підходи:

- утилізації теплової енергії пари вторинного кипання в балансі орієнтовно до вироблення електричної енергії (не теплової);
- застосування турбін малої потужності з високим відносним внутрішнім ККД при прямій заміні редуційно-охолоджувальних вузлів (РОУ);
- застосування непрецензійних відцентрових одноступеневих турбін в сучасних схемах паропостачання (при умові утилізації теплоти пари вторинного кипання);
- орієнтування на термодинамічну досконалість системи (ексергетичну ефективність).

Розглянемо схему системи паропостачання, для якої РОУ замінено на парову турбіну малої потужності (послідовна система паропостачання з використанням динамічного потенціалу гострої насиченої пари). Схему системи зображено на Рис. 1.

Питанням застосування парових турбін малої потужності для системи паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу гострої насиченої пари присвячено значну кількість праць [1, 2, 3, 4].

Ключовим для наявних парових турбін малої потужності є підвищення відносного внутрішнього ККД (з метою наближення до наявних теплоперепадів), що виносить параметрів пари за турбіною в область вологої пари.

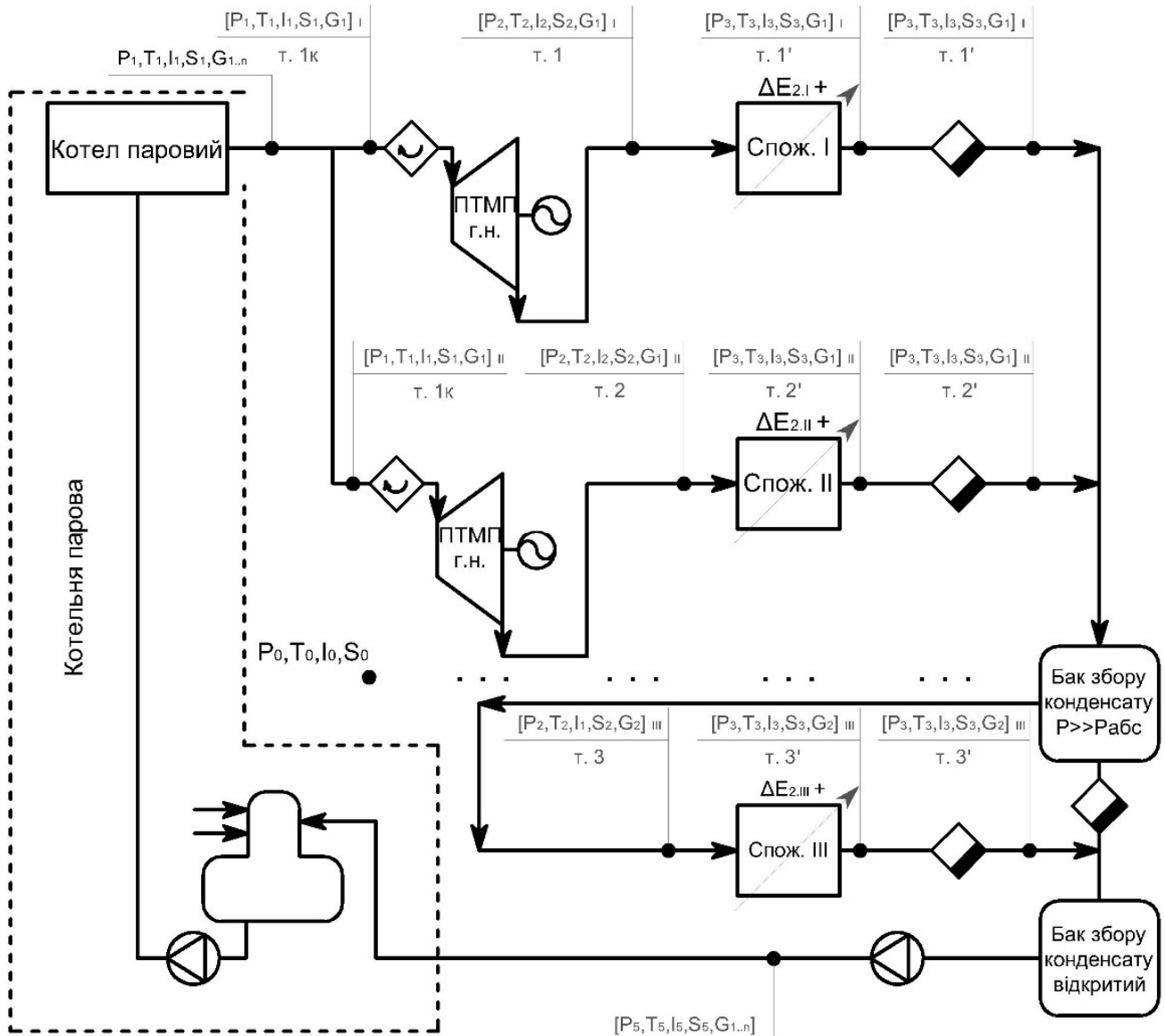


Рис. 1. Принципова схема системи паропостачання з прямою заміною РОУ та утилізацією динамічного потенціалу гострої насиченої пари

Це в свою чергу зменшує енергетичний рівень технологічного процесу, що в результаті впливає на якісні та кількісні виробничі показники. Крім цього, необхідність витримувати високі значення внутрішнього відносного ККД призводить до збільшення питомих вартісних характеристик пристрою.

Принципова схема системи паропостачання з прямою заміною РОУ та утилізацією динамічного потенціалу гострої насиченої пари включає в себе парову котельню, турбіну малої потужності та споживачів системи, підключених паралельно, конденсатовідвідники, центральний бак збору конденсату, та технологічний та/або комунально-побутовий споживач (ТКПС), підключений до баку збору.

В схемі насичена пара з параметрами  $P_1, T_1, I_1, S_1, G_{1..n}$  надходить до центральної парової гребінки, після якої розподіляється на споживачів системи. Після парової гребінки пара з параметрами  $P_1, T_1, I_1, S_1, G_i$  надходить до турбіни, після якої отримує параметри  $P_2, T_2, I_2, S_2, G_{i+ROU}$ , необхідні для роботи  $i$ -го споживача. При цьому протікає процес перетворення теплової енергії пари в механічну енергію валу турбіни. В споживача, приймаючи до уваги припущення, протікає процес повної конденсації насиченої водяної пари. Застосування конденсатовідвідника показано для розуміння неможливої поточної повної конденсації насиченої пари в споживача з метою унеможливлення пропуску газової фази і більш повного спрацювання

енергії фазової складової.

Після конденсатівідвідника пара з параметрами  $P_2, T_2, I_2, S_2, G_1 + POУ$  надходить до центрального баку збору конденсату, де відбувається відбір вторинної пари на ТКПС. Надлишки пари вторинного скипання скидаються в атмосферу.

Базуючись на принципах максимального використання вторинних енергоресурсів системи

паропостачання промислового підприємства пропонується послідовна схема паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу перегрітої пари вторинного скипання (рис. 2), для якої проведено термодинамічний аналіз (рис. 3 і 4).

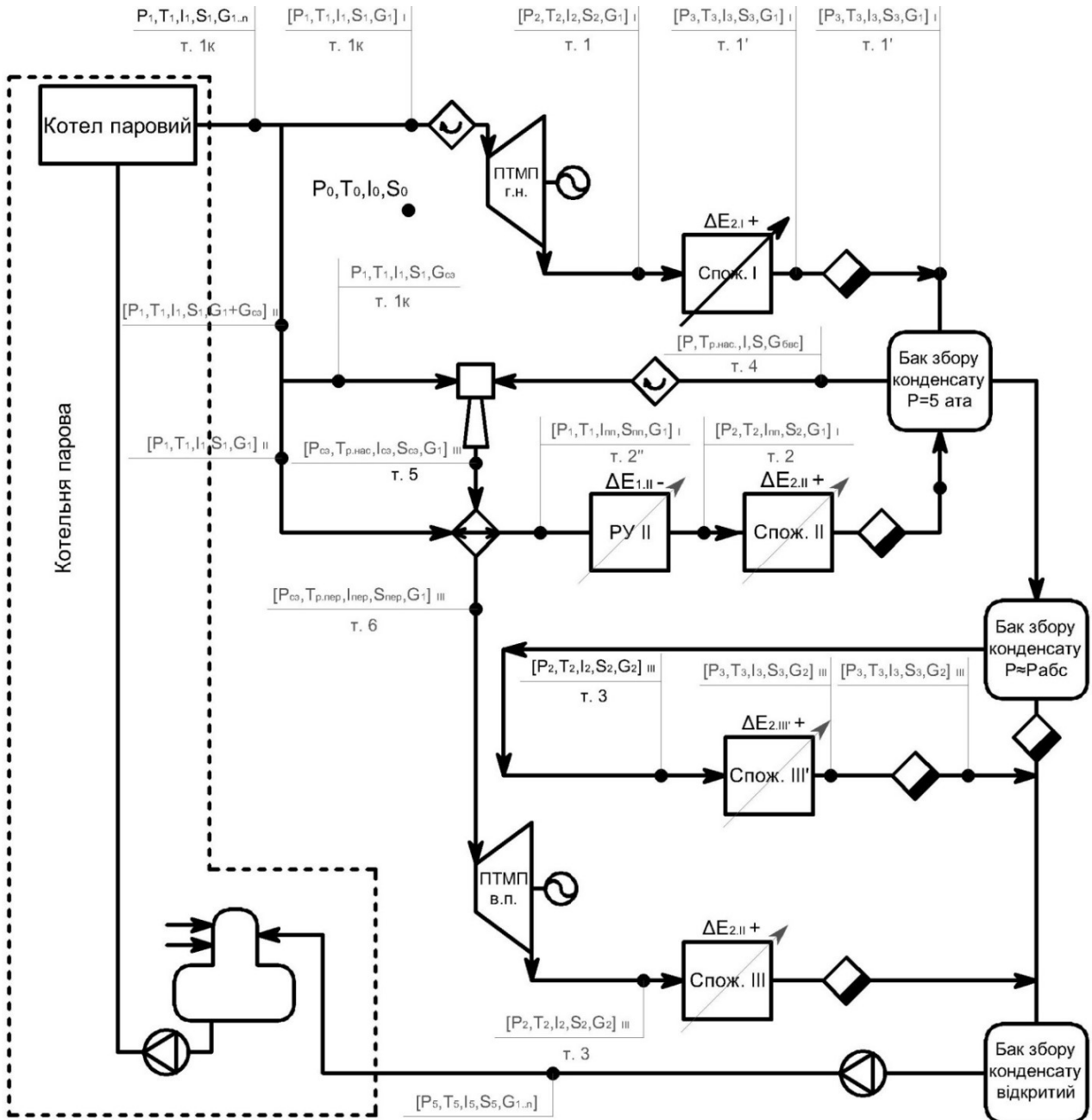


Рис.2. Послідовна схема паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу перегрітої пари вторинного скипання





Рис.3. Фрагмент TS-діаграми води та водяної пари. Характерні термодинамічні процеси паралельної схеми паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу гострої насиченої пари



Рис.4. Фрагмент TS-діаграми води та водяної пари. Характерні термодинамічні процеси послідовної схеми паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу перегрітої пари вторинного скипання

Відпрацьована пара першого та другого споживачів надходять до закритого баку вторинного скипання, тиск в якому не повинен перевищувати тиск пари другого споживача. Тиск баку вторинного скипання підтримується струминним паровим ежектором, який в якості ежектуючої речовини використовує гостру насичену пару з котельні. Оптимальне значення тиску в баку вторинного скипання визначається з умов максимального значення тиску за СПЕ та мінімальної витрати гострої пари. Відпрацьований конденсат баку вторинного скипання надходить до закритого баку, для якого тиск практично дорівнює атмосферному. Можливі зміни тиску в закритому «атмосферному» баку призводять до утворення певної кількості пари вторинного скипання, яка напряму або через бак-акумулятор може бути спожита комунально-побутовим споживачем (наприклад технологічним ГВП). Пара за СПЕ надходить до пароперегрівача, де протікає теплообмін між нею та гострою насиченою парою. Таким чином теплообмінник заміняє собою охолоджувальну частину РОУ третього споживача, при цьому кондиціуючи (перегрівуючи)

пару за СПЕ до параметрів, оптимальних для роботи турбіни.

Особливістю схеми є використання турбіни малої потужності, для якої не висуваються вимоги щодо високого відносного внутрішнього ККД (дослідження таких турбін стали вкрай актуальними останніми роками та відображені в працях [5, 6]). Для такої турбіни фактичний тепловперепад створюється з використанням ВЕР, а параметри за нею повинні забезпечити відповідного споживача.

Фізична (концептуальна) модель системи паропостачання представлена у вигляді термодинамічного аналізу систем паропостачання. Аналізуються характерні процеси перетворення та станів пари і конденсату.

Для оцінки потужності турбіни в залежності від параметрів технології може бути використаний підхід, наведений нижче. Потужність турбіни в результаті визначається за формулою (1). Витрата пари на турбіну визначається згідно залежності:

$$G_{\text{турб}} = \frac{n+1}{n} \cdot G_{\text{БВС}} = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{\sum_1^i G_{i,\text{БВС}} \cdot \frac{\sum_1^i (G_{i,\text{БВС}} \cdot I_{i,\text{к,БВС}})}{\sum_1^i G_{i,\text{БВС}}} - I_{\text{вих,БВС}}}{r_{\text{р=рБВС}}}, \quad (1)$$

т/год

Параметри СПЕ знаходяться згідно номограм станів. Ентальпія пари перед турбіною визначається згідно залежності

$$I_{\text{турб}} = I_{\text{СПЕ}} + \frac{G_{i+1} \cdot (I_{\text{гостр}} - I_{i+1})}{G_{\text{турб}}}, \quad \text{кДж/кг} \quad (2)$$

При застосуванні послідовної схеми паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу перегрітої пари вторинного скипання при ступені сухості вихідної пари не менше 95-96% можливо досягнення додаткової електричної потужності на рівні (рис. 5):

- (135-140, кДж/кг) × (G<sub>III</sub>, кг/с) при використанні пристроїв з невисоким відносним внутрішнім ККД на рівні 35-40%
- (215-250, кДж/кг) × (G<sub>III</sub>, кг/с) – з відносним внутрішнім ККД 60-70%.

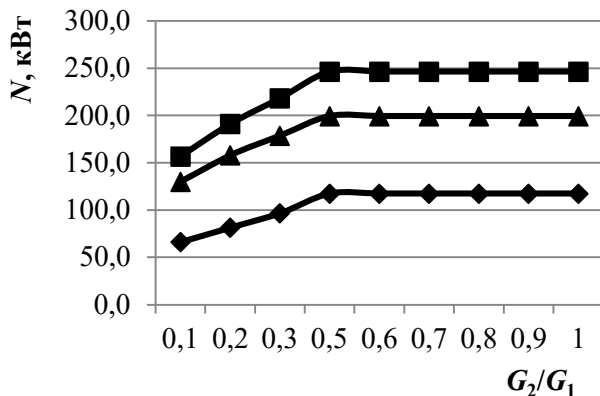


Рис.5. Зміна потужності турбіни від різних параметрів системи та в умовах змінної витрати пари на 2 споживачі (при витраті 1-го споживача на рівні 10 т/год):

- – параметри "котел-споживач 1-споживач 2-споживач 3" - 25-16-5-1 Ата;
- ▲ – параметри "котел-споживач 1-споживач 2-споживач 3" - 16-16-5-1 Ата;
- ◆ – параметри "котел-споживач 1-споживач 2-споживач 3" - 13-5-3-1 Ата

Для оцінювання термодинамічної досконалості систем пропонується послідовний підхід до визначення енергетичних та ексергетичних показників роботи елементів системи.

Очевидно, що теплота фазового переходу

«вода-пара» з підвищенням тиску пари зменшується, що об'єктивно дозволяє збільшувати паропроодуктивність котла. Характерні значення зміни теплоперепадів на ключових елементах котлоагрегату наведені в табл 1 та на рис. 6.

Таблиця 1

Характерні теплоперепадів в елементах котлоагрегату при зміні тиску пари

Тиск пари, Ата	Ентальпія пари, кДж/кг	Ентальпія конденсату, кДж/кг	Теплота фазового переходу, кДж/кг	Теплоперепад на жив. насосі (ЖН), кДж/кг	Загальний теплоперепад котла, кДж/кг
2,5	2716	537	2179	201	2380
2,8	2721	553	2168	217	2385
3,1	2724	567	2157	231	2388
3,4	2728	579	2149	243	2392
3,7	2732	594	2138	258	2396
4	2735	606	2129	270	2399
4,3	2738	618	2120	282	2402
4,6	2741	627	2114	291	2405
4,9	2744	637	2107	301	2408
6	2754	674	2080	338	2418
7	2761	698	2063	362	2425
8	2764	723	2041	387	2428
10	2777	765	2012	429	2441
12	2783	803	1980	467	2447
14	2788	832	1956	496	2452
16	2788	862	1926	526	2452
18	2797	887	1910	551	2461
20	2798	912	1886	576	2462
22	2798	932	1866	596	2462
24	2801	957	1844	621	2465
26	2798	974	1824	638	2462
28	2797	992	1805	656	2461

Отримані дані свідчать про значне зменшення теплоти фазового переходу «вода-пар» при зростанні вихідного тиску пари. Проте повний теплоперепад котлоагрегату залишається практично незмінним, що пов'язано із необхідністю збільшення затрат енергії на ЖН.

Таким чином в загальному енергетичному балансі тиск пари за котлоагрегатом (при постійній температурі зворотного конденсату) не впливає на його енергетичний ККД.



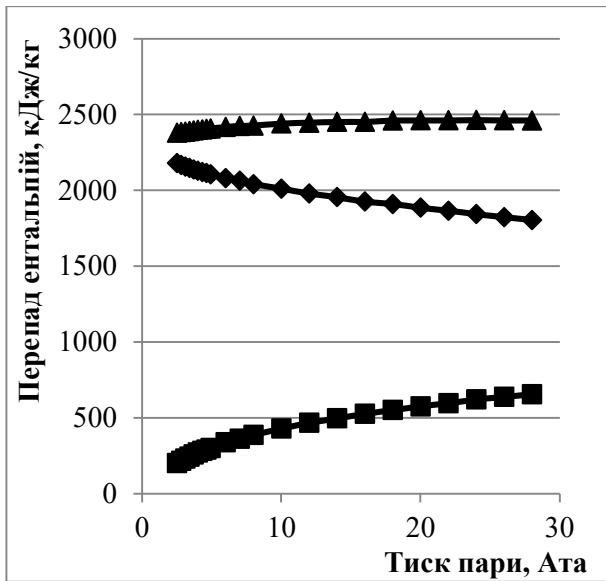


Рис. 6. Залежність характерних теплоперепадів від вихідного тиску пари:  
 ■ – теплоперепад на ЖН, ♦ – теплота фазового переходу пари, ▲ – наявний повний теплоперепад на котлоагрегаті

Оцінимо зміну ексергетичного ККД котлоагрегату при зміні вихідних параметрів пари. Проведемо обчислення ексергетичного ККД котла для вироблення методики його оцінки.

До кожного кілограму пари за рахунок теплообміну з  $m$  кг газів підводиться теплота рівна  $(h_n - h_{3d})$ .

Для цього повітря за рахунок спалювання палива повинно бути нагріте від температури  $t_0 = 10$  °С до температури  $t_4 = 2000$  °С (калориметрична температура горіння умовного палива) з витратою теплоти палива, що дорівнює  $q_{пал}$ .

Витрата повітря (тобто продуктів згорання) в розрахунку на 1 кг пари становитиме

$$m = (h_n - h_{3d}) / [\eta_{ка} \cdot (h_4 - h_{0,e})] = (3471,4 -$$

$$- 136,7) / [0,91 \cdot (2597,2 - 284,5)] = 1,5845 \text{ кг/кг пари}$$

Ексергія цієї кількості повітря дорівнює

$$e_4 = m \cdot [(h_4 - h_{0,r}) - T_0 \cdot (s_4 - s_{0,e})] = 1,5845 \cdot [(2597,2 - 284,5) - 283,15 \cdot (9,1476 - 6,8307)] = 2625,7 \text{ кДж.}$$

Таким чином, втрата ексергії при згоранні палива становитиме

$$\Delta e_{ce} = e_{пал} - e_4 = 3664,5 - 2625,7 = 1038,8 \text{ кДж}$$

Підведення теплоти до води та водяної пари здійснюється при ізобарному відводі її від газоподібних продуктів згорання. При цьому виникає велика втрата ексергії через теплові втрати в навколишнє середовище, включаючи втрати з відхідними газами, і внаслідок необоротності процесу теплообміну між газами і водяною парою при кінцевій різниці температур. Ці втрати можна представити, скориставшись введенням в поняттям ексергетичної температури  $\tau_e = 1 - T_0/T$ . У діаграмі  $\tau_{e,q}$  ексергія теплоти, відданої газами, і ексергія теплоти, підведеної до води та водяної пари, зображуються площами під відповідними лініями, що представляють зміну ексергетичної температури теплоносіїв (рис. 7). Втрати ексергії внаслідок необоротності теплообміну в цій діаграмі зображується заштрихованою площею, а втрати ексергії з димовими газами - двічі заштрихованою площею.

Чисельно ж обидві ці втрати сумарно можна знайти як різницю між витраченою ексергією газів  $e_4$  і ексергією, отриманою водою і паром ( $e_n - e_{3d}$ )

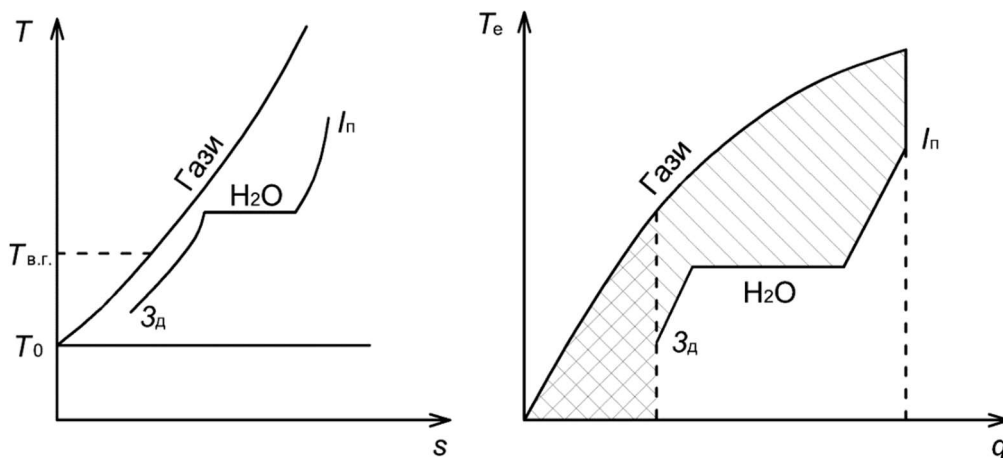


Рис. 7. Діаграми ексергетичних складових пари та продуктів згорання

$$\Delta e_{мет} = e_4 - (e_n - e_{з0}) = 2625,7 - (1600,8 - 15,6) = 1041,3 \text{ кДж}$$

Таким чином, загальна втрата ексергії в паровому котлі становить

$$\Delta e_{ка} = \Delta e_{сз} + e_{мет} = 1038,8 + 1041,3 = 2080,1 \text{ кДж,}$$

а ексергетичний ККД його дорівнює

$$\eta_{ex}^{ка} = 1 - \Delta e_{ка} / e_{пал} = 1 - 2080,1/3664,5 = 0,432$$

Ентальпію продуктів згоряння на виході з котла  $h_{в.г.}$  можна визначити з теплового балансу  $(h_n - h_{з0}) = m \cdot (h_4 - h_{в.г.})$ . Звідси

$$h_{в.г.} = h_4 - (h_n - h_{з0})/m = 2597,2 - (3471,4 - 136,7)/1,5845 = 492,6 \text{ кДж/кг}$$

і, визначивши термодинамічні параметри стану пари, можна знайти  $t_{в.г.} = 214,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $s_{в.г.}^0 = 7,3816$  і розрахувати ексергію відхідних газів

$$e_{в.г.} = m \cdot [(h_{в.г.} - h_{0,г.}) - T_0 \cdot (s_{в.г.}^0 - s_{0,г.})] = 1,5845 \cdot [(492,6 - 284,5) - 283,15 \cdot (7,3816 - 6,8307)] = 82,6 \text{ кДж/кг пари.}$$

Варіюючи вихідні дані щодо параметрів пари на виході з котла, отримано залежність ексергетичного ККД від тиску вихідної пари. В загальному вигляді залежність щодо визначення ексергетичного ККД котлоагрегату виглядає [7-10]

$$\eta_{екс,к} = 1 - \frac{\Delta e_{ка}}{e_{пал}} \quad (3)$$

Використовуючи методичний підхід, викладений вище, римаємо залежність визначення ексергетичного ККД котла

$$\eta_{екс,к} = 1 - \frac{e_{конд} - e_{пара} + e_{пал}}{e_{пал}} \quad (4)$$

Ця залежність може бути трансформована

$$\eta_{екс,к} = \frac{e_{конд}}{e_{пал}} + \frac{e_{пара}}{e_{пал}} \quad (5)$$

Приймаючи до уваги, що

$$e_{пал} = q_{пал} = (h_n - h_{з0})/\eta_{ка},$$

в кінцевому вигляді отримаємо залежність

$$\eta_{екс,к} = \frac{e_{конд}}{e_{пал}} + \frac{e_{пара}}{e_{пал}}; \quad (6)$$

$$\eta_{екс,к} = \frac{T_{пара} \cdot S_{пара} - T_{конд} \cdot S_{конд} - I_{пара} + I_{конд}}{I_{пара} - I_{конд}} \times \eta_{ен,к} \quad (7)$$

При зіставленні результатів енергетичного і ексергетичного аналізу звертає на себе увагу велика різниця в оцінці втрат в паровому котлі. Енергетичний ККД котлоагрегату значно вищий ніж ексергетичний. Пов'язано це з тим, що при енергетичному аналізі котел розглядається фактично як теплообмінник, в якому є втрати з газами і за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем. Як організовані процеси використання хімічної енергії палива і передачі теплоти воді і парі при цьому не враховується. При ексергетичному ж аналізі показується роль процесу спалювання палива.

При спалюванні палива втрачається  $\Delta e_{ст}/e_{пал}$  значна частина ексергії хімічної енергії палива. Це свідчить про те, що спалювання палива є не кращим способом використання його хімічної енергії. Кращі показники можуть бути отримані, наприклад, при використанні палив в електрохімічних перетворювачах (паливних елементах). Так наприклад, при здійсненні реакції метан + кисень в такому устаткуванні вся хімічна енергія може бути перетворена в роботу (тобто в ексергію).

Другою складовою втрат ексергії в паровому котлі є втрати з відхідними продуктами згоряння, зменшити які можна тільки знизивши температуру, при якій вони залишають котел, і за рахунок теплових втрат в навколишнє середовище. Вона визначається тими ж факторами, що і враховуються при енергетичному аналізі. Величина цих втрат залежить від конструкції і якості виготовлення котла.

Наступна складова втрат ексергії обумовлена необоротністю процесу передачі теплоти від газів до води і пари при значній різниці температур. Саме вона характеризує котел з точки зору досконалості процесу перетворення енергії. Середня температура робочого тіла циклу в процесі підведення теплоти тут значно нижче середньої температури верхнього теплового джерела - гарячих газоподібних продуктів згоряння.

Наводяться параметри характерних точок

для варіанту компоновки системи паропостачання зі споживачами.

1. Параметри пари за котлом:  
 $P_{1.0} = 13$  Ата;  $T_{1.0} = 195,3$  °С;  
 $I_{1.0} = 2786$  кДж/кг;  $S_{1.0} = 6460$  Дж/(кг·К);  
 $G_{1.0} = 11,1$  т/год.
2. Споживач 1 (пара):  
 $P_{1.1} = 5$  Ати;  $T_{1.1} = 159$  °С;  $I_{1.1} = 2754$  кДж/кг;  
 $S_{1.1} = 6752$  Дж/(кг·К);  $G_{1.1} = 10$  т/год;  
 $I_{1.1(H_2O)} = 892$  кДж/кг.

Параметри продукції на виході:  
 $T_{1.1*} = 150$  °С;  $S_{1.1*} = 1848$  Дж/(кг·К);  
 $G_{1.1*} = 32505,79$  кг/год.

3. Споживач 2 (пара):  
 $P_{1.11} = 3$  Ата;  $T_{1.11} = 148$  °С;  
 $I_{1.11} = 2747$  кДж/кг;  $S_{1.11} = 6912$  Дж/(кг·К);  
 $G_{1.11} = 1,1$  т/год;  $I_{1.11(H_2O)} = 637$  кДж/кг.

Параметри продукції на виході:  
 $T_{1.11*} = 150$  °С;  $S_{1.11*} = 1848$  Дж/(кг·К);  
 $G_{1.11*} = 4051,876$  кг/год.

4. Споживач 3 (пара):  
 $P_{1.111} = 0,5$  Ати;  $T_{1.111} = 111$  °С;  
 $I_{1.111} = 2691$  кДж/кг;  $S_{1.111} = 7212$  Дж/(кг·К);  
 $G_{1.111} = 0,12$  т/год;  $I_{1.111(H_2O)} = 339$  кДж/кг.

Параметри продукції на виході:  
 $T_{1.111*} = 95$  °С;  $T_{1.111**} = 70$  °С;  
 $S_{1.111*} = 1253$  Дж/(кг·К);  
 $S_{1.111**} = 964$  Дж/(кг·К);  
 $G_{1.111*} = 2562,14$  кг/год.

5. Параметри навколишнього середовища:  
 $P_0 = 1$  Ата;  
 $T_0 = 20$  °С;  
 $S_0 = 301$  Дж/(кг·К);  
 $\phi_0 = 0,5$  од.

1. Втрати ексергії в технологічних процесах розраховуються згідно методики:

- питомі втрати ексергії:  
 $\Delta e_1 = 90,909$  кДж/кг;  
 $\Delta e_{II} = 90,909$  кДж/кг;  
 $\Delta e_{III} = 19,973$  кДж/кг.
- втрати ексергії:  
 $\Delta E_1 = 820,852$  кВт;  
 $\Delta E_{II} = 102,32$  кВт;  
 $\Delta E_{III} = 14,215$  кВт.

Сумарні втрати ексергії:  
 $\sum \Delta E = 937,387$  кВт.

2. Ексергія потоку пари на виході з котла розраховується згідно методики:

Питома ексергія пари на виході з котла –  
 $e_{1.0} = 981,413$  кДж/кг.  
 Ексергія пари на виході з котла –  
 $E_{1.0} = 3026,023$  кВт.

3. Нульова ексергія води розраховується згідно з методикою:  
 $e_{0H_2O} = 93,828$  кДж/кг.

4. Ексергія потоку пари за РОУ I розраховується згідно з методикою:

Питома ексергія потоку пари за РОУ I –

$$e_{1.1} = 863,857 \text{ кДж/кг.}$$

Ексергія потоку пари за РОУ I –

$$E_{1.1} = 2399,603 \text{ кВт.}$$

5. Ексергія потоку пари за РОУ II розраховується згідно методики:

Питома ексергія потоку пари за РОУ II –

$$e_{1.11} = 809,977 \text{ кДж/кг.}$$

Ексергія потоку пари за РОУ II –

$$E_{1.11} = 247,493 \text{ кВт.}$$

6. Потужність турбін розраховується згідно методики:  
 $N_I = 64,13$  кВт;  $N_{II} = 7,75$  кВт.

Проводячи аналіз схемних рішень енергоефективних систем паропостачання промислових підприємств та використовуючи запропонований підхід отримано значення ексергетичної ефективності на рівні 18-22% (табл. 2).

Таблиця 2

Ексергетична ефективність енергоефективних систем паропостачання з характерними параметрами системи паропостачання та технологій

Параметри пари за котлом		Параметри 1-го споживача		Параметри 2-го споживача		Параметри 3-го споживача		$\eta_{ex}, \%$	$\eta_{ex+k}, \%$ (з урахуванням котельні)
$P_{1.0},$ Ата	$T_{1.0},$ °С	$P_{1.1},$ Ати	$T_{1.1},$ °С	$P_{1.11},$ Ати	$T_{1.11},$ °С	$P_{1.111},$ Ати	$T_{1.111},$ °С		
Паралельна схема паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу гострої насиченої пари									
13	195,3	5	159	3	148	0,5	111	36,9	16,61
23	221,7	16	204	4	152	0,5	111	40,3	20,15
Послідовна схема паропостачання промислового підприємства з використанням динамічного потенціалу перегрітої пари вторинного скипання									
13	195,3	5	159	3	148	0,5	111	40,5	18,23
23	221,7	16	204	4	152	0,5	111	43,5	21,75

### Висновки

1. Заміна РОУ на турбіни малої потужності без використання ВЕР та без додаткового кондиціонування параметрів пари дозволяє отримати додаткову електричну потужність на рівні для першого споживача при перепаді 25/16 Ата - на рівні  $(20-25 \text{ кДж/кг}) \times (G, \text{ кг/с})$  кВт, для другого при перепаді 25/5 Ата -  $(150-160 \text{ кДж/кг}) \times (G, \text{ кг/с})$ .

2. Влаштування турбіни, що працює в якості утилізатора ВЕР вторинної пари, параметри якої

кондиційовані гострою парою з котельні, дозволяє досягати потужності на рівні  $(135-140, \text{кДж/кг}) \times (G, \text{кг/с})$  при використанні пристроїв з невисоким відносним внутрішнім ККД на рівні 35-40 % та  $(215-250, \text{кДж/кг}) \times (G, \text{кг/с})$  при роботі пристроїв з відносним внутрішнім ККД 60-70% та ступенем сухості вихідної пари не менше 95-96 %.

3. Застосування схемних рішень систем паропостачання з утилізацією ВЕР у вигляді пари вторинного скипання та виробленням електричної енергії призводить до збільшення енергетичної ефективності систем на 0,5-1,5% за рахунок збільшення коефіцієнту повернення конденсату до значень 0,85-0,9 та на 1,5-2,5% за рахунок додаткової потужності, що генерується турбінами гострої насиченої та вторинної перегрітої пари.

4. Ексергетична ефективність систем паропостачання з утилізацією ВЕР у вигляді пари вторинного скипання та виробленням електричної енергії може досягати значень 36,9-44,2%, з урахуванням ексергетичного ККД котлоагрегату 16,61-22,1 %.

5. Низькопотенційні «хвостові» споживачі (СО, ГВС) підвищують ексергетичний ККД сис-

теми паропостачання промислового підприємства на 0,2-0,6 % у випадку приєднання на стороні пари вторинного скипання.

6. Можливості підвищення термічного ККД циклу за рахунок зниження температури відведення теплоти практично вичерпані, для підвищення ефективності циклу ПТУ слід шукати шляхи збільшення середньої температури робочого тіла в процесі отримання теплоти від верхнього теплового джерела.

7. Підвищення параметрів (тиску та температури) пари веде до зростання ексергетичного ККД котла, що особливо актуально в умовах перетворення технологічної системи паропостачання в мініТЕЦ.

8. Будь-які процеси генерації електричної енергії пов'язані із отриманням значної потужності теплової енергії, повинні супроводжуватися її утилізацією; підприємства, які використовують пар в якості енергоносія (це ж стосується і енергетичних підприємств типу ТЕС та АЕС), для глибокої утилізації ВЕР, повинні мати у своєму складі споживачів теплової енергії, якими можуть виступати як комунально-побутові споживачі (в разі їх наявності), так і нові технологічні споживачі теплової енергії

#### Література

1. Гапоненко Н.А. Энергосбережение при установке малых турбин на котельных с промышленными потребителями / Н.А. Гапоненко // Когенерация в промышленности и коммунальной энергетике: Программа и тезисы международной конференции. – Киев, 2004. – С. 179–182.
2. Левченко Е.В. Эффективность турбоустановок малой мощности / Е.В. Левченко, В.П. Сухинин, А.Д. Кантемир, В.М. Капинос и др. // Вестник национального технического университета «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2006. – № 5. – с. 12-14.
3. Сенецкий А.В. Энергосбережение на основе применения турбин малой мощности на низкикипящих рабочих телах / А.В. Сенецкий // Современные проблемы машиностроения. Конференция молодых ученых и специалистов 3-6.11.2010 г.: тез. докл. – Харьков, 2010. – с. 67.
4. Modelling of low-pressure steam turbines operating at very low flowrates: A multiblock approach. A. Mambro, E. Galloni, F. Congiu, N. Maraone. Applied Thermal Engineering Volume 158, 25 July 2019, 113782. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113782>.
5. Computational modeling of non-equilibrium condensing steam flows in low-pressure steam turbines. Ahmed M. Nagib Elmekawy, Mohey Eldeen H.H. Ali. Results in Engineering Volume 5, March 2020, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100065>.
6. Experimental results of a low-pressure steam Rankine cycle with a novel water lubricated radial inflow turbine for the waste heat utilization of internal combustion engines. Christoph Laux, Andreas Gotter, Frank Eckert, Matthias Neef. Energy Conversion and Management Volume 271, 1 November 2022, 116265. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116265>.
7. Exergy analysis of a steam-turbine power plant using thermocombustion. Joaquín Zueco, Damián López-Asensio, F.J. Fernández, Luis M. López-González. Applied Thermal Engineering. Volume 180, 5 November 2020, 115812. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115812>.
8. A loss method for exergy auditing of steam boilers. A. Behbahaninia, S. Ramezani, M. Lotfi Hejrdoost. Energy. Volume 140, Part 1, 1 December 2017, Pages 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.090>.
9. Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plants. Amin Mohammadi Khoshkar Vandani, Mokhtar Bidi, Fatemeh Ahmadi. Energy Conversion and Management. Volume 106, December 2015, Pages 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.018>.
10. Emissions and energy/exergy efficiency in an industrial boiler with biodiesel and other fuels. Ke-Wei Lin, Horng-Wen Wu. Case Studies in Thermal Engineering. Available online 9 September 2023, 103474. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103474>.

UDC 621.311.22

## Modern heat and steam supply systems of industrial enterprises using deep utilization of the technological steam energy potential

O. Pohosov<sup>1</sup>, N. Chepurna<sup>2</sup>, P. Pasichnyk<sup>3</sup>, E. Kulinko<sup>4</sup>, A. Doroshenko<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, pogosov\_aleksandr@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2158-8897

<sup>2</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, chepurnayanv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8044-7563

<sup>3</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, pasichnik.pavlo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8499-6949

<sup>4</sup>assistant. Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, yevhen\_kulinko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8834-3600

<sup>5</sup>director of "Complex design and construction" LLC, Kyiv, Ukraine, andreydoroshenko81@gmail.com

*Abstract. Steam supply systems of industrial enterprises, as a type of heat supply system, are a large consumer of primary energy in national energy balances. In turn, due to the specificity of thermodynamic steam processes, steam supply systems of industrial enterprises in practice have significant unused potential of secondary energy resources (SEP). Modern steam supply systems should be built exclusively when evaluating their exergetic efficiency, which will make it possible to evaluate the effectiveness of such systems grossly in all elements of the life cycle of the project: energy, economic, ecological and even social. The article shows modernized thermal schemes of steam supply systems, for which it is possible to achieve additional electrical power at the level of 135-250 kW/(kg/s) when devices with a relative internal efficiency of up to 60-70 % are operating. In combination with an increase in the percentage of condensate return and the utilization of secondary energy resources (SRP), the increase in energy efficiency of the system is 2-4 %, and the absolute value of exergetic efficiency is 16-22 %, taking into account the exergetic efficiency of the boiler unit. Low-potential "tail" consumers: the heating system, the hot water supply system - increase the exergy efficiency of the steam supply system of an industrial enterprise by 0.2-0.6 % in the case of joining on the steam side of secondary boiling. Any processes of generating electrical energy are associated with obtaining a significant amount of thermal energy, and must be accompanied by its utilization; enterprises that use steam as an energy carrier (the same applies to energy enterprises such as thermal power plants and nuclear power plants) for the deep utilization of hydroelectric power plants must have thermal energy consumers in their composition, which can act as communal household consumers (if they exist), as well as new technological consumers of thermal energy.*

*Keywords: industrial energy, steam supply, steam turbine, exergy, exergy efficiency.*

Надійшла до редакції / Received 05.04.2023

# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 45

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 17.04.2023. Формат 60×84 1/8  
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Умов. друк. арк. 6,63. обл. вид. арк. 7,21.  
Наклад 100 прим. Замовлення № 161404

