

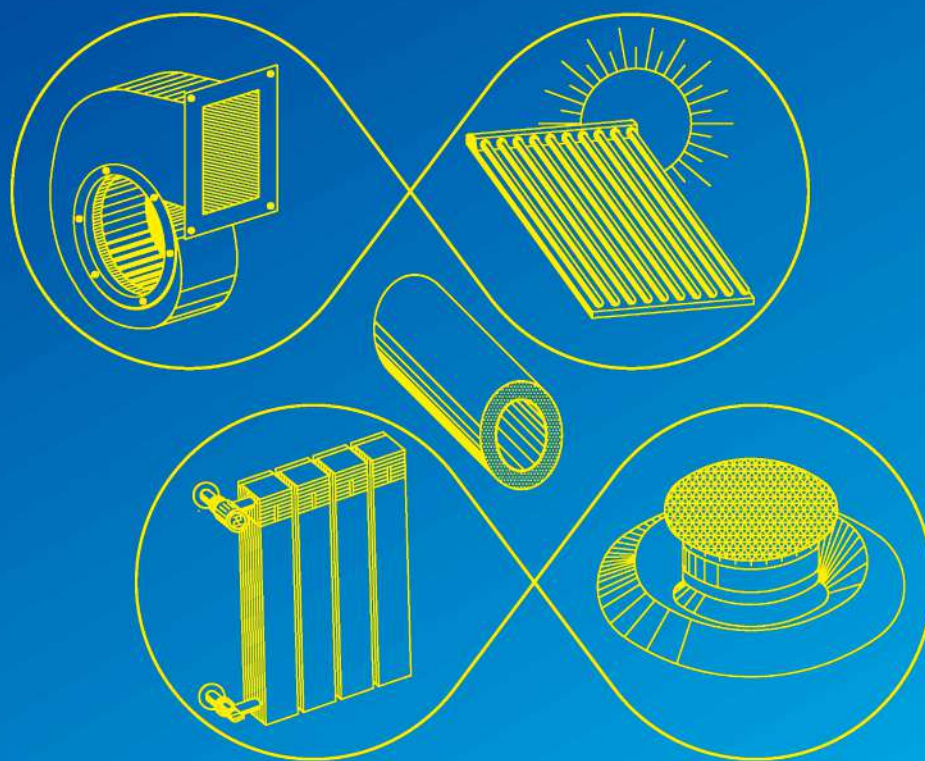
# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



2021

Випуск 39

*НАМ 20 РОКІВ*



**Міжнародна науково-практична конференція**

**Екологія, ресурси, енергія**

**ERE-2021**

**24-26 листопада 2021 р.**

**КИЇВ 2021**

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 39

Kyiv 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

# **ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*заснований у 2001 році*

ВИПУСК 39

Київ 2021

УДК 697

ISSN 2409-2606

B29

**Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:** науково-технічний збірник. – Вип. 39 / відповідальний редактор В. О. Мілейковський. – Київ: КНУБА, 2021. – 61 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, доцент В. О. Мілейковський (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Михайленко; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. екон. наук, доцент К. М. Предун; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професор Т. М. Ткаченко; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, ст. наук. співр. Г. В. Жук; докт. техн. наук, професор В. А. Кравець; докт. техн. наук, професор Г. Гавардашвілі (Грузія); докт. техн. наук, професор З. Гвішіані (Грузія); докт. техн. наук, професор Н. Мамедов (Азербайджан); докт. техн. наук, професор Б. Рашуо (Сербія); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); докт. техн. наук, професор М. Улевіч (Польща); доктор інженер, доцент А. Ліс (Польща); доктор інженер, доцент А. Уйма (Польща); докт. техн. наук, професор О. Токмаджян (Вірменія); докт. техн. наук, професор А. Маргарян (Вірменія); докт. техн. наук, доцент В. Токмаджян (Вірменія); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 29 жовтня 2021 року, протокол № 45.

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

## ЗМІСТ

<i>До відома авторів</i> .....	5
В. В. Попов, В. О. Мілейковський, О. С. Тригуб <i>Експертне експрес-оцінювання впливу тепломасообмінних процесів на залишковий ресурс корпусу реактора ВВЕР-1000 через циклічну пошкоджуваність</i> .....	6
М. П. Сенчук <i>Підвищення ефективності спалювання твердого палива в шарі</i> .....	29
П. М. Гламаздин, К. О. Баранчук, О. В. Приймак <i>Нові підходи до організації централізованого теплопостачання</i> .....	38
Т. М. Ткаченко, В. О. Мілейковський, Я. Б. Лопатюк <i>Проблеми спалювання для теплопостачання сміття від надвиробництва одягу “швидкої моди”</i> .....	47
В. М. Чередніков, О. В. Череднікова, Д. В. Гузик <i>Випробування вентилятора системи охолодження двигуна внутрішнього згорання гелікоптера в умовах жаркого клімату</i> .....	53

## CONTENTS

<i>Information for the Authors</i> .....	5
V. Popov, V. Mileikovskiy, O. Tryhub <i>Expert express assessment of the impact of heat and mass transfer processes on the residual life of the WWER-1000 reactor vessel due to cyclic damage (in Ukrainian)</i> .....	6
M. Senchuk <i>Increasing the efficiency of burning solid fuel in the layer (in Ukrainian)</i> .....	29
P. Glamazdin, K. Baranchuk, O. Priymak <i>New approaches to the organization of district heating (in Ukrainian)</i> .....	38
T. Tkachenko, V. Mileykovskiy, Ya. Lopatiuk <i>Incineration problems for the heat supply using garbage from the overproduction of fast fashion clothing (in Ukrainian)</i> .....	47
V. Cherednikov, O. Cherednikova, D. Guzyk <i>Testing the cooling system of the helicopter internal combustion engine in hot climates (in Ukrainian)</i> .....	53

## До відома авторів

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

4 грудня 20 років тому було підписано до друку наш перший випуск. Тоді Збірник був всеукраїнським. За цей час очолювали редколегію відомі вчені, педагоги, професори А. А. Худенко, А. Я. Ткачук, Е. С. Малкін, Ю. К. Росковшенко, В. Б. Довгалюк, В. П. Корбут.

Попри фінансову скруту вдалося налагодити регулярний друк чотирьох випусків Збірника на рік, безкоштовну публікацію для авторів, змінити формат видання за аналогією до світових лідерів, сформуванати міжнародну редколегію, налагодити роботу сайту збірника з усіма випусками, індексацію міжнародними базами даних, таких як Google Scholar, Index Copernicus, BASE, WorldCat. 17 березня 2020 р. Міністерство освіти і науки України присвоїло збірнику категорію “Б”. Сподіваємося на подальше плідне співробітництво.

Продовжуємо публікацію статей за матеріалами Другої Міжнародної науково-практичної конференції “Довкілля, ресурси, енергія” ERE-2021 факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

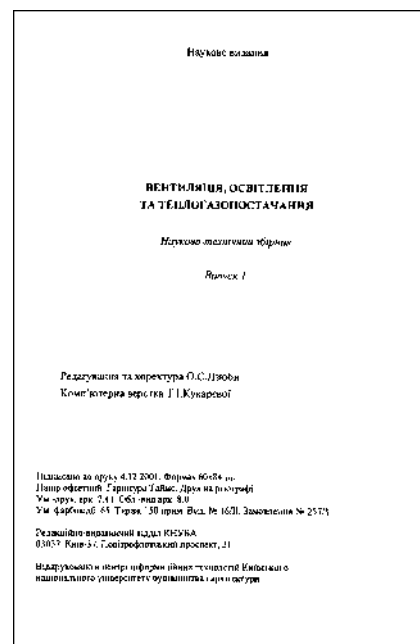
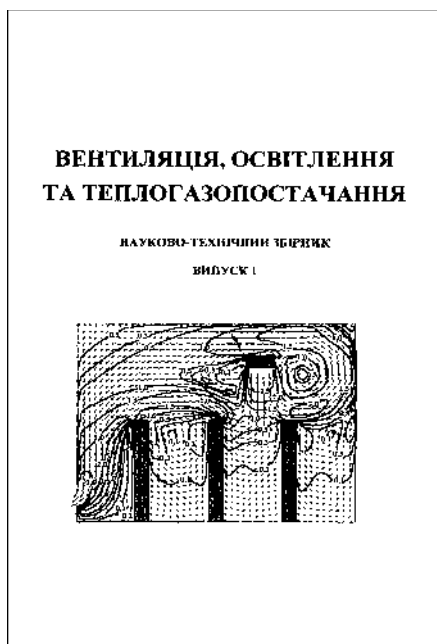
## Information for the Authors

Dear authors and reviewers of articles of the Scientific and Technical Collection “Ventylatsiia, Osvitlennia ta Teplohozopostachannia” (“Ventilation, Illumination and Heat and Gas Supply”)!

On this day 20 years ago, our first issue was signed for publication. The Collection was all-Ukrainian. During this time, the editorial board was headed by well-known scientists, professors: A. Khudenko, A. Tkachuk, E. Malkin, Yu. Roskovshenko, V. Dovgalyuk, V. Korbut.

Despite financial difficulties, it was possible to establish regular printing of four issues of the Collection per year, free publication for authors, change the format of the issue by analogy with world leaders, form an international editorial board, establish a collection site with all issues, indexing by international databases such as Google Scholar, Index Copernicus, BASE, WorldCat. On 17 March 2020, the Ministry of Education and Science of Ukraine awarded the collection category “B”. We hope for further fruitful cooperation.

In the issue, we continue publication of articles on the materials of the Second International scientific and practical conference “Environment, Resources, Energy” ERE-2021 of Engineering Systems and Ecology Department, Kyiv National University of Construction and Architecture.



УДК 621

## Експертне експрес-оцінювання впливу тепломасообмінних процесів на залишковий ресурс корпусу реактора ВВЕР-1000 через циклічну пошкоджуваність

В. В. Попов<sup>1</sup>, В. О. Мілейковський<sup>2</sup>, О. С. Тригуб<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ст.наук.співробітник НДЧ, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [v.v.popov.1962@gmail.com](mailto:v.v.popov.1962@gmail.com), ORCID: 0000-0002-3396-0951

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [v\\_mil@ukr.net](mailto:v_mil@ukr.net), ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>3</sup>к.ф-м.н., доц., “Національний університет “Києво-Могилянська академія”, м. Київ, Україна, [as\\_trigub@yahoo.com](mailto:as_trigub@yahoo.com), ORCID: 0000-0002-6573-2814

*Анотація. Україна залишається країною, яка залежить від атомної енергетики як для теплопостачання міст-супутників, так і для електропостачання. У містах, близьких до атомних електростанцій, доцільне електричне опалення від виробленої ними електроенергії. З іншого боку, Україна – єдина держава у світі, де трапилася найбільш важка аварія на атомній електростанції – на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС у ніч проти 26 квітня 1986 року. Іншою характерною особливістю атомної енергетики України є значна кількість енергоблоків з вичерпаним проектним ресурсом – так званих «старих» енергоблоків. Зношення їх пов'язане з впливом тепломасообмінних процесів, що призводять до періодичної температурної деформації елементів, яка викликає циклічну пошкоджуваність. Наведено приклад експертної експрес-оцінки залишкового ресурсу конкретного корпусу реактора ВВЕР-1000 з урахуванням сумісної дії нестационарних тепломасообмінних та механічних процесів. Виконано розгорнутий експрес-розрахунок циклічної (втомленої) пошкоджуваності металу корпусу реактору ВВЕР-1000 внаслідок небезпечного аварійного режиму.*

*Ключові слова: атомна електростанція, тепломасообмінні процеси, температурна деформація, циклічна пошкоджуваність.*

### Використані скорочення:

АЕС – атомна електростанція;  
АЕУ – атомна енергетична установка;  
АС – аварійна ситуація;  
ВВЕР – водо-водяний енергетичний реактор;  
ВП – відокремлений підрозділ;  
ГВ – гідровипробування;  
З – зупин;  
ІЯД – інститут ядерних досліджень;  
КНВ – канал нейтронного вимірювання;  
КР – корпус реактору (з верхнім блоком);  
НУЕ – нормальні умови експлуатації;  
ПНАЕ – правила і норми в атомній енергетиці;  
ПНУЕ – порушення НУЕ;  
САОЗ – система аварійного охолодження зони;  
СУЗ – система управління захистом;  
ТК – термоконтроль.

**Вступ.** Україна залишається країною, яка залежить від атомної енергетики як для теплопостачання міст-супутників, так і для електропостачання. У містах, близьких до атомних електростанцій, доцільне електричне опалення від виробленої ними електроенергії.

Україна – єдина держава в світі, де трапилася найбільш важка аварія на атомній електричній станції (АЕС) – на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС в ніч на 26 квітня 1986 року. Так, наприклад, аварія на АЕС Фукусима-1 (Японія) 11 березня 2011 року за

радіаційними наслідками становить лише 10% від аварії на Чорнобильській АЕС. А аварія на енергоблоці № 2 АЕС Три-Майл-Айленд (США) 28 березня 1979 року хоч і була важкою, але повністю локалізованою в межах залізобетонної захисної оболонки станції до стадії екологічно чистої «зеленої галявини» (біля цієї АЕС).

Іншою характерною особливістю атомної енергетики України є значна кількість енергоблоків АЕС з вичерпаним проектним ресурсом – так званих «старих» енергоблоків (табл. 1).

Так, з 15-ти наявних енергоблоків АЕС України лише три не досягли свого проектного терміну експлуатації (ЗАЕС-6, ХАЕС-2 і РАЕС-4). Решта «старих» енергоблоків АЕС працюють за межами проектного терміну експлуатації після заходів з його подовження.

**Актуальність дослідження.** Для вказаних непростих умов України, важливість коректної оцінки безпеки і ресурсу АЕС є вкрай актуальною [1-5]. Звісно, для таких оцінок завжди є бажаним і актуальним використання [6] сучасних комп'ютерних програм (програмних засобів, ПЗ) на базі чисельних розрахункових методів (зокрема, методу кінцевих елементів, МКЕ).



Енергоблоки з вичерпаним проектним ресурсом

Назва АЕС	№№ енергоблоку	Реактори	Потужність, МВт	Завершення проектного терміну експлуатації	Подовження терміну експлуатації
Запорізька (ЗАЕС)	1	ВВЕР-1000	1000	23.12.2015	23.12.2025
	2	ВВЕР-1000	1000	19.02.2016	19.02.2025
	3	ВВЕР-1000	1000	05.03.2017	05.03.2027
	4	ВВЕР-1000	1000	04.04.2018	04.04.2028
	5	ВВЕР-1000	1000	27.05.2020	27.05.2030
	6	ВВЕР-1000	1000	21.10.2026	–
Рівненська (РАЕС)	1	ВВЕР-440	440	22.12.2010	22.12.2030
	2	ВВЕР-440	440	22.12.2011	22.12.2031
	3	ВВЕР-1000	1000	11.12.2017	11.12.2037
	4	ВВЕР-1000	1000	07.06.2035	–
Хмельницька (ХАЕС)	1	ВВЕР-1000	1000	13.12.2018	13.12.2028
	2	ВВЕР-1000	1000	07.09.2035	–
Южно-Українська (ЮУАЕС)	1	ВВЕР-1000	1000	02.12.2013	02.12.2023
	2	ВВЕР-1000	1000	12.05.2015	31.12.2025
	3	ВВЕР-1000	1000	10.02.2020	10.02.2030

Як показує практика, регулярне застосування програм для моделювання [7] завжди супроводжується тривалим і складним моделюванням об'єктів розрахункового аналізу, тестуванням комп'ютерних моделей, складними і значними обсягами розрахунків і аналізів їх результатів. Для цього необхідні значні коштовні, часові, кваліфіковані людські і технічні ресурси.

**Останні дослідження та публікації.** При оцінюванні ресурсу АЕС враховують такі навантаження, режими, нормативні вимоги і критерії міцності корпусу реактору [1], що виникають як від дії температурних деформацій при нестационарних теплообмінних процесах, так і від механічних навантажень:

- пункт 1.2.1 [1]:
  - циклічне накопичення пластичної деформації через змінний, яке призводить до неприпустимої зміни розмірів або квазістатичного руйнування;
  - виникнення макротріщин при циклічному вантаженні;
- пункт 1.2.6 [1]:
  - розрахунок на статичну міцність;
  - розрахунок на циклічну та тривалу циклічну міцність;
  - розрахунок на опір крихкому

руйнуванню;

- пункт 5.1.3 [1]:
  - внутрішній і зовнішній тиск;
  - температурні впливи;
- пункт 5.1.4 [1]:
  - пуск;
  - стаціонарний режим;
  - зміна потужності реактору;
  - зупинка;
  - гідро- або пневмовипробування;
  - аварійна ситуація.
- пункт 5.6.19 [1]:
  - умова міцності при наявності різноманітних циклічних навантажень перевіряється за формулою:

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i}{[N_0]_i} = a \leq [a_N], \quad (1)$$

де  $N_i$  – число циклів  $i$ -го типу за час експлуатації;  $k$  – загальне число типів циклів;  $[N_0]_i$  – допустиме число циклів  $i$ -го типу;  $a$  – накопичене втомне пошкодження, граничне значення якого  $[a_N] = 1$ .

Зазначимо, що найбільш відповідальними і критичними елементами конструкції КР (рис. 1), міцність яких викликає занепокоєння, є: фланцеві з'єднання СУЗ, КНВ та ТК, кришка

з патрубками СУЗ, КНВ та ТК, вузол ущільнення реактора, зона зварного з'єднання сорочки патрубка САОЗ до наплавки КР, розділове кільце, зварні з'єднання № 3 та № 4. Надалі оцінено прогноз стану зварного з'єднання № 3 для жорсткої АС, про який викладено нижче. Відносно нього оцінено і залишковий ресурс/строк служби КР.

Слід зауважити, що під час заходів з подовження експлуатації енергоблоку № 1 прогноз ресурсу/строку служби корпусу реактора ВВЕР-1000 даного енергоблоку було виконано ВП ЮУАЕС для режиму «OTHER 1.2».

При моделюванні необхідно сумісно розглядати як нестационарні тепломасообмінні процеси, так і механічні, особливо під час позаштатних ситуацій. Дані про аварійний режим АЕС, що розглядається тут, наступні.

У [5] наведена наступна інформація (мовою оригіналу): «Из анализа неблагоприятных событий на АЭС удалось сохранить наиболее опасные данные из несанкционированных режимов, состоявшихся 25.12.82 г. на блоке № 1 ЮУАЭС (сброс пара из трубопровода «собственных» нужд) и там же 22.10.85 г. («провал» давления пара в ПГ сбросом пара из него). При «верхнем» пределе по проекту скорости изменения температуры теплоносителя в 1-м контуре 60 °С/ч для аварийного расхолаживания при событиях имели место скорости расхолаживания 334 °С/ч и 1800 °С/ч соответственно. Причём, руководство станции пыталось утаить эти события, однако по другим каналам надзорные органы были информированы об этих опасных режимах и, соответственно, требовали со станции акты их расследования».

Тобто, до кінця 1985 року на блоці № 1 ВП ЮУАЕС мали місце принаймні дві аварійні ситуації з жорстким охолодженням 1-го контуру, до якого входить і реактор. Результати аналізу наявної документації ЮУАЕС свідчать, що з двох АС, наведених у [5], врахована лише перша, менш жорстка АС, що, згідно з [5], мала місце 25 грудня 1982. Друга ж, значно жорсткіша аварійна ситуація зі швидкістю охолодження 1-го контуру 1800 К/год, що, згідно зі змістом [5] мала місце 22 жовтня 1985 року, вочевидь, не врахована. У подальшому, для зручності викладання в даній публікації, даний режим означено як «22.10.85» (за датою події). При аварійному охолодженні внутрішньої поверхні стінки реактора швидкість цього охолодження відповідає даним публікації [5] і дорівнює 1800 К/год = 0,5 К/с. З урахуванням цієї швидкості температура внутрішньої поверхні стінки реактора на початку режиму знижується з 563,15 К до 373,15 К за 380

секунд і в подальшому утримується в межах 373,15 К до зникнення температурного градієнту за товщиною стінки реактора. Відповідна тривалість режиму підрахована і становить 15000 с.

**Формулювання цілей статті.** Для оперативних і відносно недорогих експертних оцінок безпеки і надійності складних і відповідальних систем і елементів АЕС не менш актуальним є коректне застосування інженерно-аналітичних розрахункових експрес-процедур, відносно спрощених порівняно з великими комп'ютерними програмними комплексами.

**Основна частина.** Охолодження стінки змодельовано залежним від часу охолоджувальним потоком  $q(T)$ , Вт/м<sup>2</sup> за законом (рис. 2)

$$q(T) = \begin{cases} -97500, & 273,15 \leq T \leq 653,15; \\ -97500 - \frac{1}{2}(60000 - 97500) \times \\ \times \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi(T - 653,15)}{0,6t - 331,89}\right) \right), & 653,15 \leq T \leq 803,15; \\ 42,553191 \cdot T - 94176,594, & 803,15 \leq T \leq 1273,15; \\ 13,333333 \cdot T - 56975,33, & 1273,15 \leq T \leq 2773,15; \\ 4,2857143 \cdot T - 31884,933, & 2773,15 \leq T \leq 6273,15; \\ 0,5555556 \cdot T - 8485,083, & 6273,15 \leq T \leq 15273,15. \end{cases}$$

Даний закон відповідає графіку  $q(T)$ , приведеному на рис. 2. Йому в свою чергу відповідає закон зміни температури внутрішньої поверхні стінки КР під час режиму «22.10.85» (АС), приведений на рис. 3.

Для даного АС одержані результати розрахунку нестационарної теплопровідності через стінку КР на рівні зварювального з'єднання № 3, сценарій зміни градієнту температур для якого приведено на рис. 4 і 5.

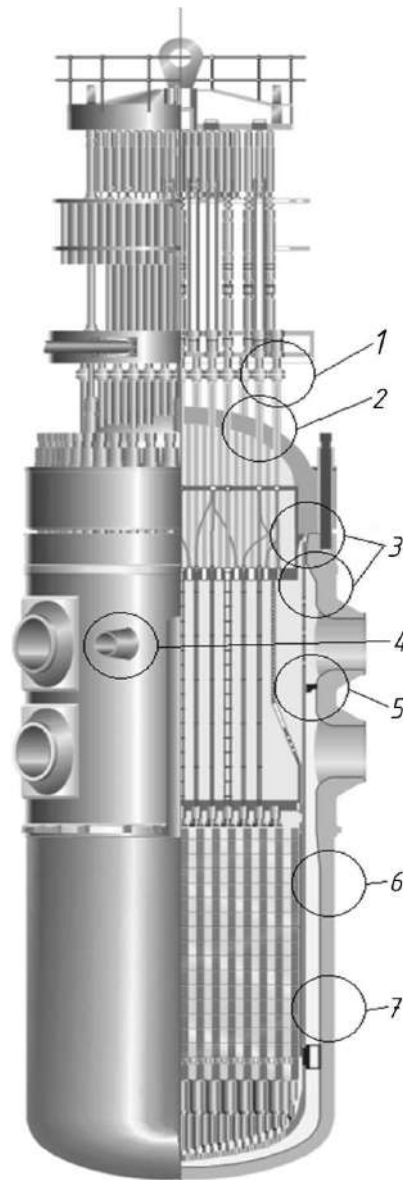


Рис 1. Критичні зони КР: 1 – фланцеві з’єднання СУЗ, КНВ та ТК; 2 – кришка з патрубками СУЗ, КНВ та ТК; 3 – вузол ущільнення реактора; 4 – зона приварювання сорочки патрубка САОЗ до наплавлення реактора; 5 – розділове кільце; 6 – зварне з’єднання № 4; 7 – зварне з’єднання № 3

Сценарій зміни температури в стінці КР визначено розв’язанням задачі нестационарної теплопровідності методом кінцевих різниць з прогінними коефіцієнтами згідно з [6].

Сценарій зміни кільцевих і осьових напружень у металі КР на рівні зварювального з’єднання № 3 (рис. 6-9) відповідає вищевказаним градієнтам температури й тиску в реакторі під час його експлуатації. Залишкові напруження від зварювання також враховані, про що вказано нижче.

Можемо оцінити циклічну міцність для зварного з’єднання № 3 КР блоку № 1 ВП ЮУ-АЕС для режимів НУЕ, ГВ та АС з урахуванням АС «22.10.85».

Розрахункову оцінку циклічної міцності отримано згідно з вимогами розділу 5.6 Норм міцності [1] (з урахуванням АС «22.10.85») та

визначення зсуву критичної температури крихкості  $\Delta T_N$  (пункт Д.3).

Приведені напруги ( $\sigma_L$ ) та умовні пружні приведені напруги ( $\sigma_F$ ) визначено згідно з вимогами розділу 5.3 [1]. Тому для визначення приведених напружень необхідно було визначення трьох головних напружень. Крім того, враховуючи, що 95,5 % товщини стінки займає основний метал і лише 4,5 % – наплавлення, для визначення напруженого стану металу стінки КР на рівні зварного з’єднання № 3 використані нормативні формули табл. ПЗ.17 Додатку 3 [1] для одношарового товстостінного циліндра, а саме – для розрахунку радіальних  $\sigma_r$ , кільцевих  $\sigma_\theta$  та осьових  $\sigma_z$  напружень.

Для оцінювання крихкої міцності за наявності кільцевої (осьової) тріщини (див. другу частину публікації) використані нормативні формули розрахунку осьових (кільцевих)

напружень  $\sigma_z$  ( $\sigma_0$ ) для двошарового товстостінного циліндру табл. ПЗ.18 Додатку 3 [1].

За результатами моделювання (рис. 6-9) найбільші температурні напруження при режимі «22.10.85» мають місце в момент найбільшого температурного градієнту в стінці КР. Згідно з прийнятими параметрами навантаження, цей момент часу 380 с. Відповідний графік температури в стінці КР одержано згідно з посібником [6] із застосуванням методу кінцевих різниць з прогінними коефіцієнтами, (рис. 10).

По-перше, виконано розрахунок пошкоджуваності для блоку навантажень «НУЕ→АС «22.10.85»» з кроком по товщині стінки через 1 мм (рис. 11-16). По-друге, розглянуто блок режимів

$$N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}) + 1 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ «22.10.85»}).$$

Розрахунок пошкоджуваності виконано для блоку навантажень «НУЕ→ГВ» з кроком за товщиною стінки через 1 мм (рис. 17-21).

На останок розраховано блоки режимів

$$N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}) + 1 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ «22.10.85»}).$$

Згідно з розділом 5.6 [1] сумарна пошкоджуваність  $a$  в даному випадку дорівнює:

$$a = \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}}.$$

Даний вираз відповідає нормативній формулі сумування циклічних пошкоджуваностей при дії декількох режимів. Циклічна пошкоджуваність металу КР на рівні зварного з'єднання № 3 відповідає наступним блокам навантаження КР, коли його напрацювання  $N$  дорівнює 30, 40 і 60 циклів/років:

- для 30 років

$$30(\text{НУЕГВ}) + 30(\text{НУЕПНУЕ}) + 30(\text{НУЕАС}) + 1(\text{НУЕАС} \text{ «22.10.85»});$$

- для 40 років

$$40(\text{НУЕГВ}) + 40(\text{НУЕПНУЕ}) + 40(\text{НУЕАС}) + 1(\text{НУЕАС} \text{ «22.10.85»});$$

- для 60 років

$$60(\text{НУЕГВ}) + 60(\text{НУЕПНУЕ}) + 60(\text{НУЕАС}) + 1(\text{НУЕАС} \text{ «22.10.85»}).$$

Оскільки в межах даної публікації визначити циклічну пошкоджуваність для блоків  $N(\text{НУЕПНУЕ}) + N(\text{НУЕАС})$  ускладнено, вона оцінена двома підходами, які дозволили окремо розглянути режими НУЕ, ГИ і АС:

$$a_{1\text{підхід}} = a_{\text{НУЕ,ГВ,ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}^{\text{Оцінка}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}^{\text{Аналіз}}} =$$

$$= a_{\text{НУЕ,ГВ,ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} + a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}^{\text{Оцінка}};$$

$$a_{2\text{підхід}} = \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Оцінка}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Оцінка}}} + a_{\text{ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} +$$

$$+ \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}^{\text{Оцінка}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}^{\text{Оцінка}}} =$$

$$= a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Оцінка}} + a_{\text{ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} + a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ 22.10.85}}^{\text{Оцінка}};$$

де

$$a_{\text{ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} = a_{\text{НУЕ,ГВ,ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} - \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Оцінка}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Оцінка}}} =$$

$$= a_{\text{НУЕ,ГВ,ПНУЕ,АС}}^{\text{АЕС}} - a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Оцінка}}.$$

У наведених формулах верхня позначка:

- «АЕС» відповідає даним про циклічну пошкоджуваність металу зварного з'єднання № 3 згідно даних ВП ЮУАЕС;
- «Оцінка» відповідає циклічній пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 згідно з розрахунками.

Отже, порівняльний аналіз результатів (табл. 2-4) демонструє, що, можливо, неврахований аварійний режим «22.10.85», зокрема, в піднаплавочній зоні зварного з'єднання № 3 становить значну частку – 79 %, 70 % та 57 % від загальної пошкоджуваності, відповідно, для 30, 40 та 60 років експлуатації КР. А отже, вплив на зростання циклічної пошкоджуваності та на зсув температури  $\Delta T_N$  можливих повторів аварійного режиму «22.10.85» разом з реалізацією проектних режимів НУЕ та ГВ занадто значний, що продемонстровано на рис. 22.

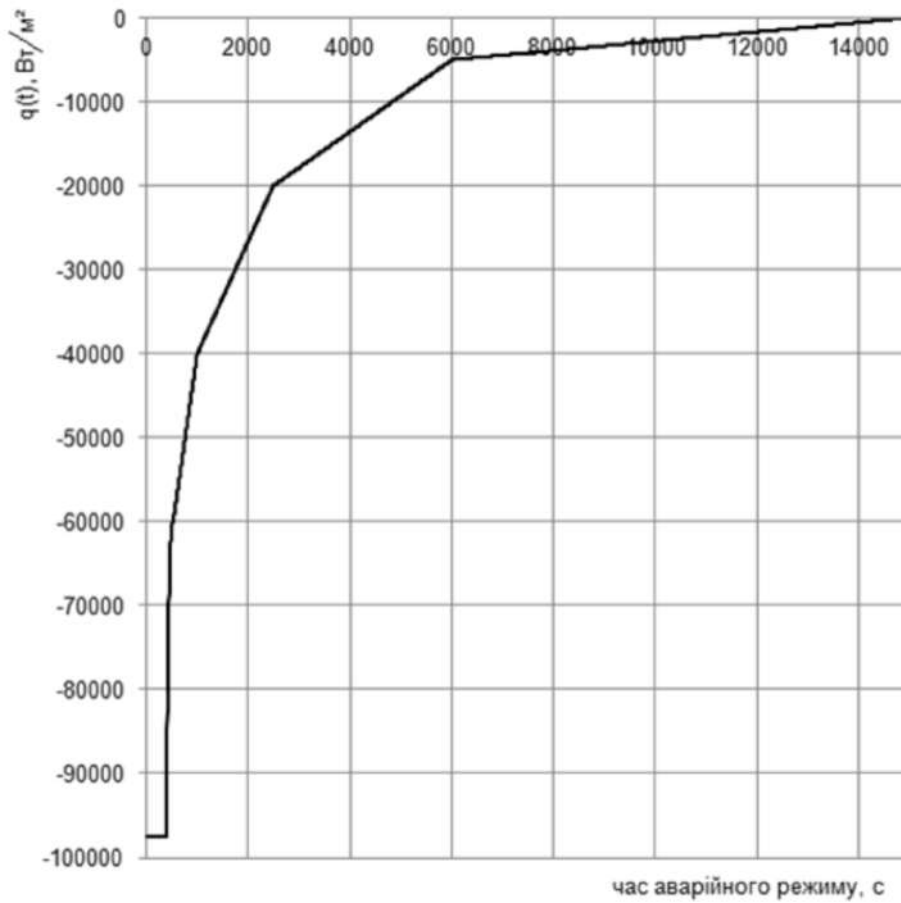


Рис. 2. Графік потоку  $q(t)$ , Вт/м<sup>2</sup>, прийнятий для охолодження внутрішньої поверхні стінки КР при режимі «22.10.85»

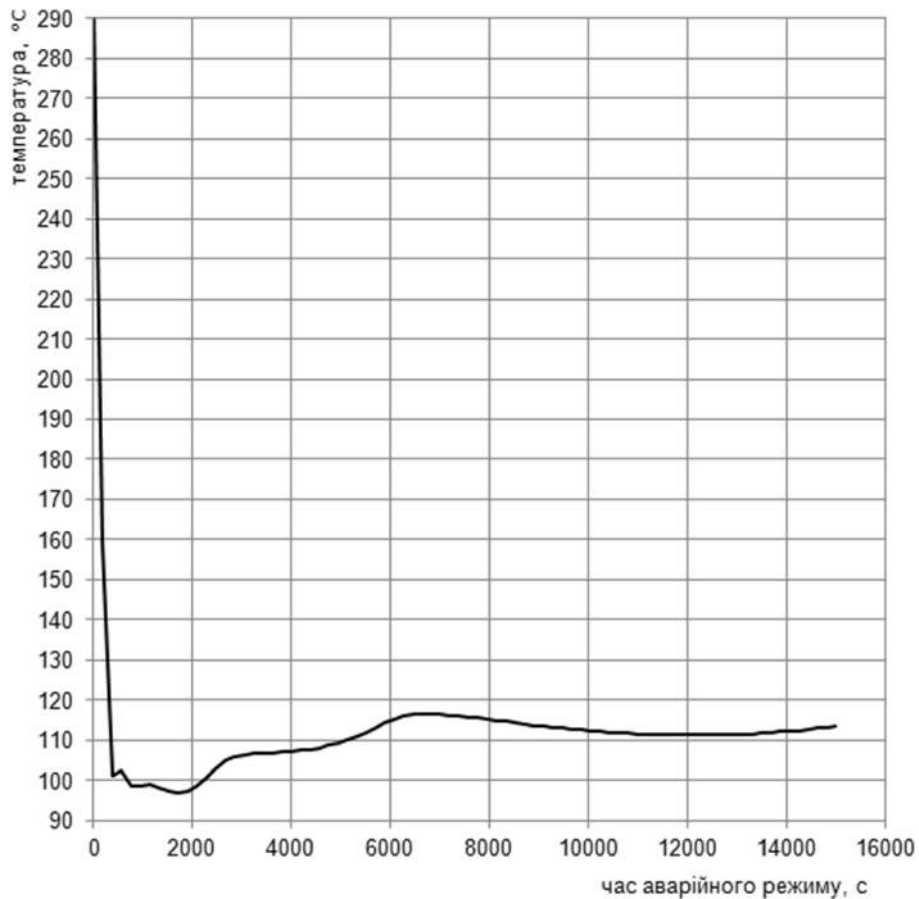


Рис. 3. Графік температури внутрішньої поверхні стінки КР при режимі «22.10.85»  $T(t)$ °C, що відповідає прийнятому в Аналізі охолоджувальному потоку  $q(t)$ , Вт/м<sup>2</sup>

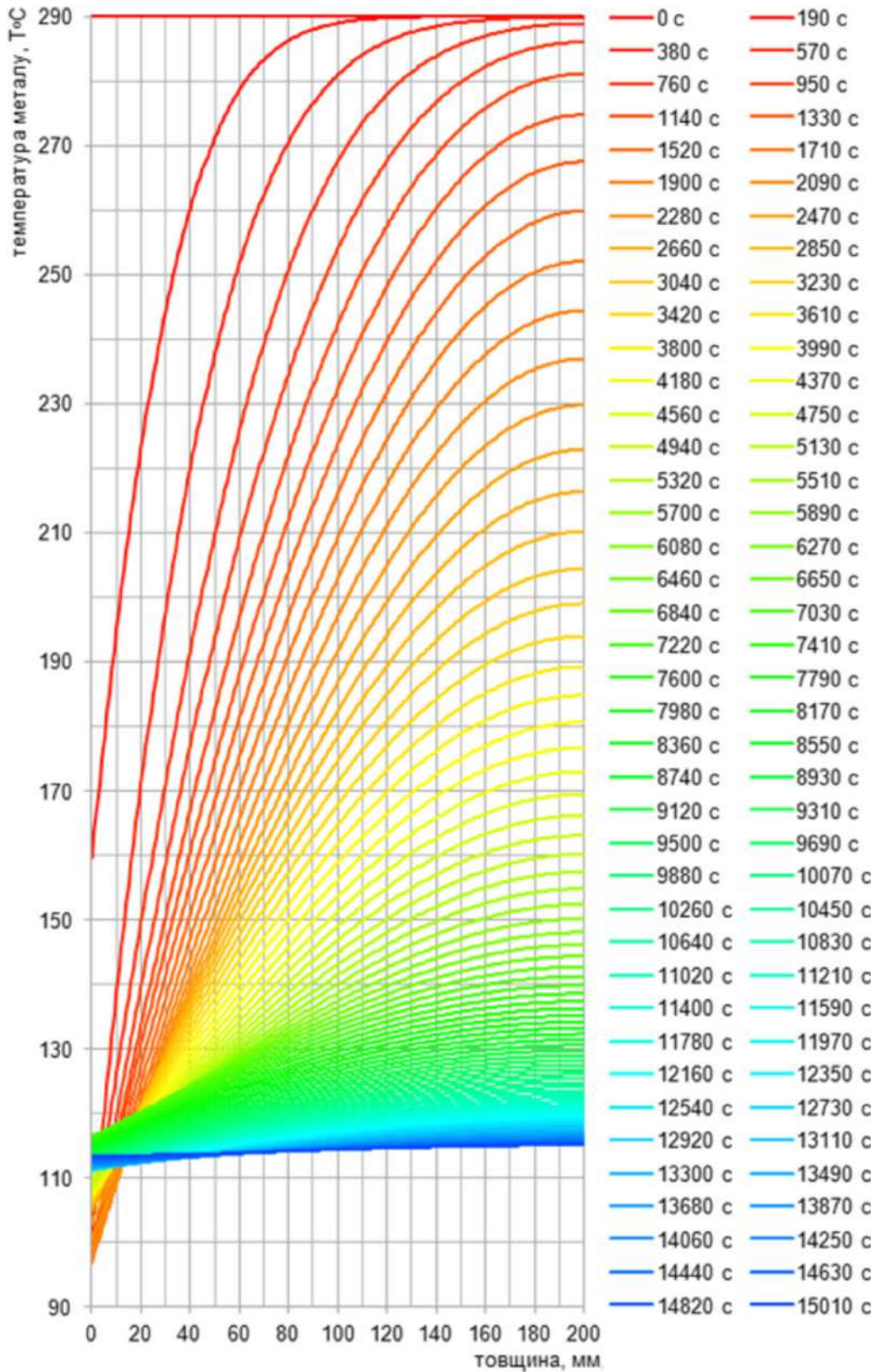


Рис. 4. Зміна температури металу КР для аварійного режиму «22.10.85»: графіки для моментів часу АС у осях «товщина стінки-температура металу»

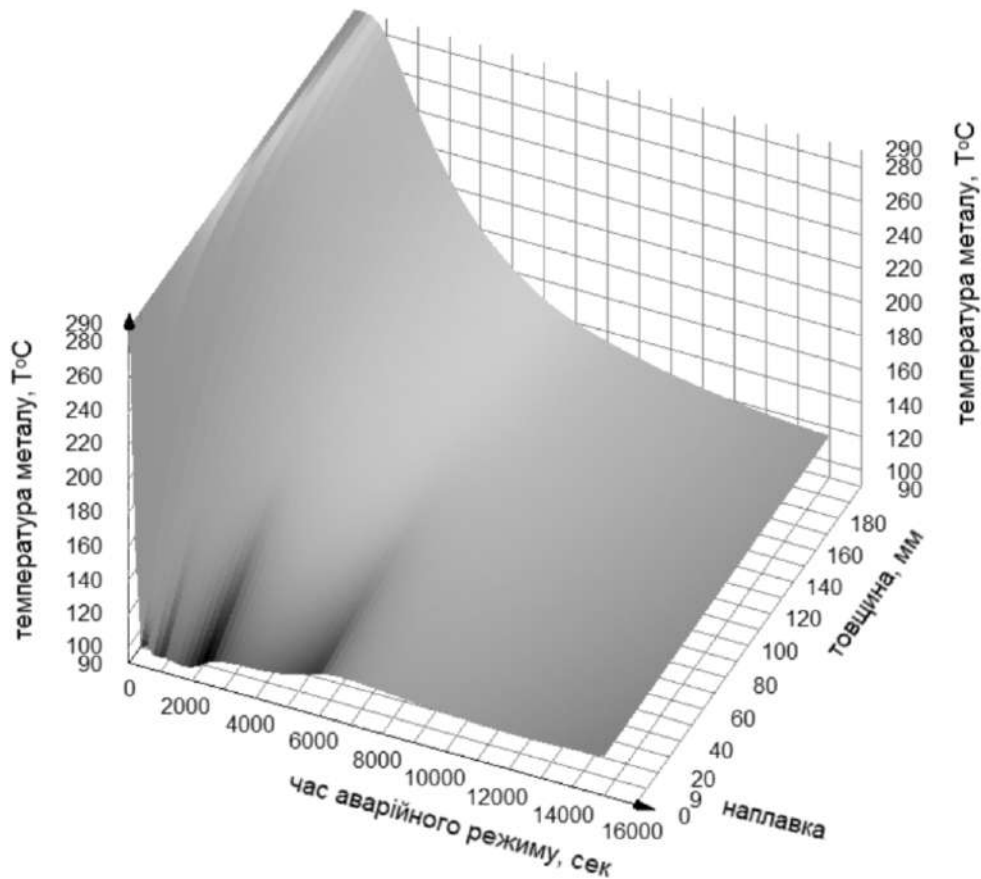


Рис. 5. Зміна температури металу КР для аварійного режиму «22.10.85»: поверхня температури у осях «товщина стінки-час АС-температура металу

**Висновки.** При оцінюванні залишкового ресурсу корпусу реактора ВВЕР-1000 через циклічну пошкоджувальність необхідно розглядати сумісну дію нестационарних тепломасообмінних та механічних процесів. Особливу увагу слід приділяти позаштатним ситуаціям, що призводять до швидкого охолодження та, від-

повідно, суттєвих напружень. Зокрема, неврахований аварійний режим на ЮУАЕС «22.10.85» в піднаплавочній зоні зварного з'єднання № 3 становить значну частину – 79%, 70% та 57% від загальної пошкоджувальності, відповідно, для 30, 40 та 60 років експлуатації КР.

### Література

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергоназор СССР – Введены в действие 01.07.1987. – Москва.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. International Atomic Energy Agency, Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants, IAEA-EBP-WWER. – 2006. – No. 8. – Rev.1.
3. Glinka G. Development of weight functions and computer integration procedures for calculating stress intensity factors around cracks subjected to complex stress fields / G. Glinka // Progress Report: Stress and Fatigue-Fracture Design, Petersburg, Ontario, Canada. – 1996. – No. 1. – 108 p.  
URL: [https://www.afgrow.net/downloads/documents/SaFFd\\_1m.pdf](https://www.afgrow.net/downloads/documents/SaFFd_1m.pdf)
4. Чирко Л. І. Порівняння українського та російського підходів до визначення параметрів окрихчування металу корпусів реакторів / Л. І. Чирко // Тези доповідей XIX щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України 24 - 27 січня 2012 р. Київ, Україна. – С. 95-96.  
URL: [http://www.kinr.kiev.ua/Annual\\_Conferences/KINR2012/pdf/KINR\\_Conference\\_2012.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2012/pdf/KINR_Conference_2012.pdf)
5. Симонов Е. Я. Продление срока эксплуатации реакторных установок АЭС, выработавших ресурс, сооружение новых АЭС - опасная техническая авантюра / Е. Я. Симонов // Атомна енергетика в Україні. – 2007.  
URL: <https://atom.org.ua/?p=159>
6. Кузнецов Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
7. Gumen O. Geometric Representation of Turbulent Macrostructure in 3D Jets / O. Gumen, V. Dovhaliuk, V. Mileikovskiy. // ICGG 2018 – Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics. ICGG 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 809. – Cham.: Springer, 2019.– P.739-745.

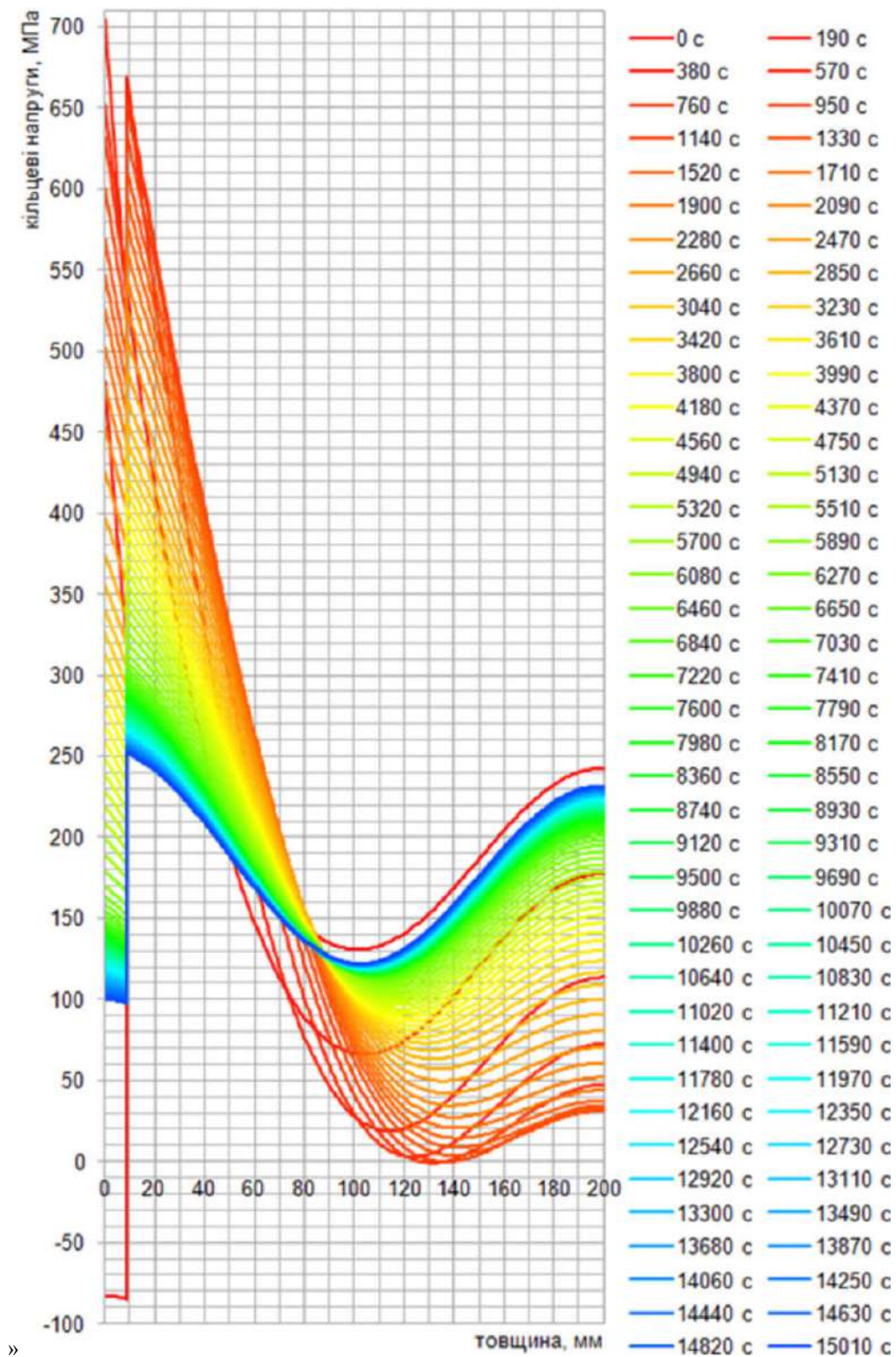


Рис. 6. Зміна кільцевих напружень металу КР для аварійного режиму «22.10.85»: графіки для моментів часу АС у осях «товщина стінки-кільцеві напруження»



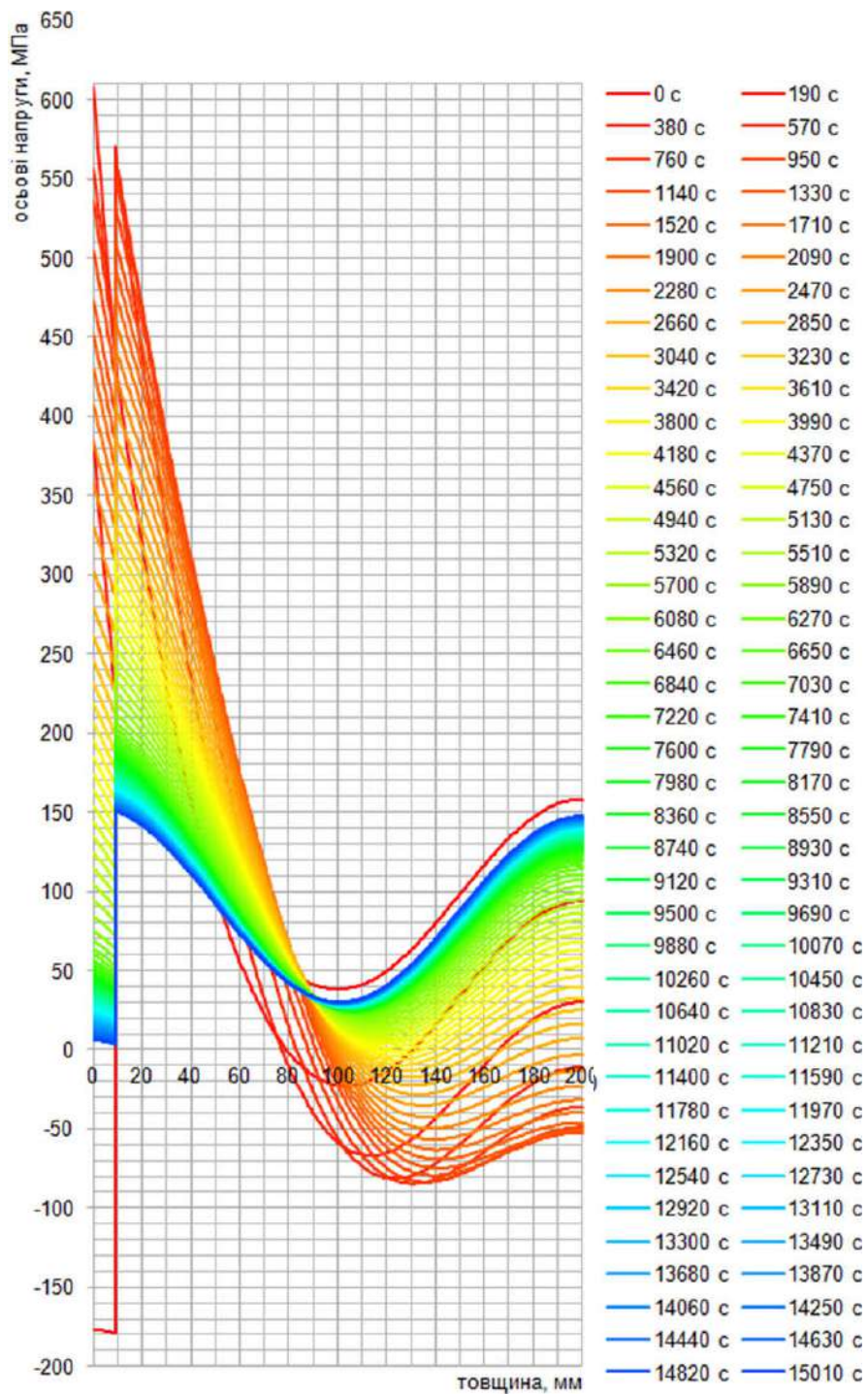


Рис. 7. Зміна осьових напружень металу КР для аварійного режиму «22.10.85»: графіки для моментів часу АС в осях «товщина стінки-осьові напруження»

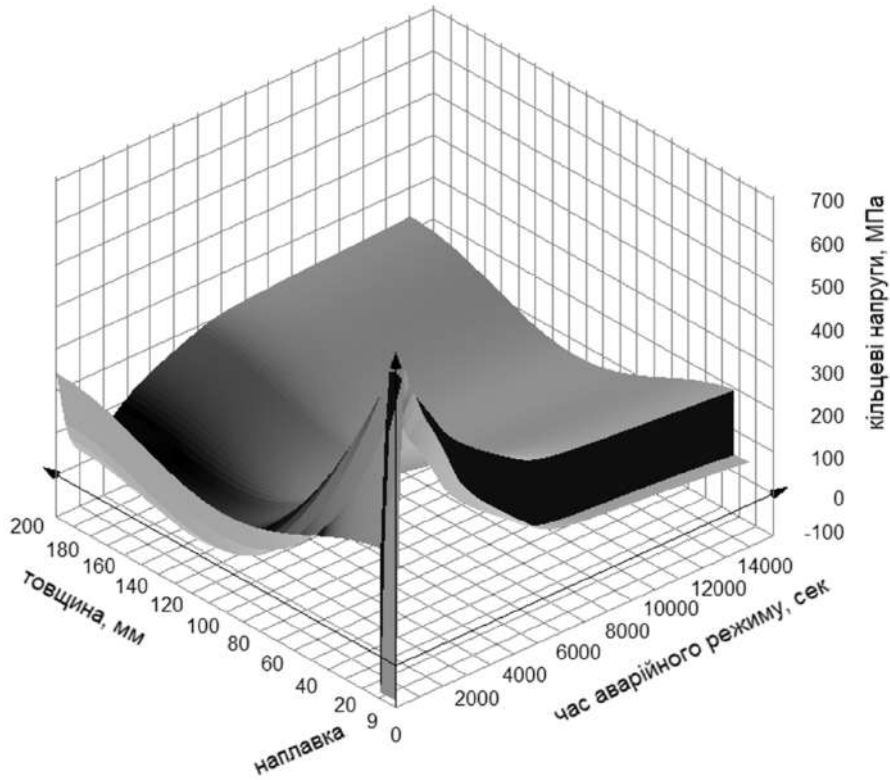


Рис. 8. Зміна кільцевих напружень металу КР для аварійного режиму «22.10.85»: поверхня кільцевих напружень в осях «товщина стінки-час АС-кільцеві напруження»

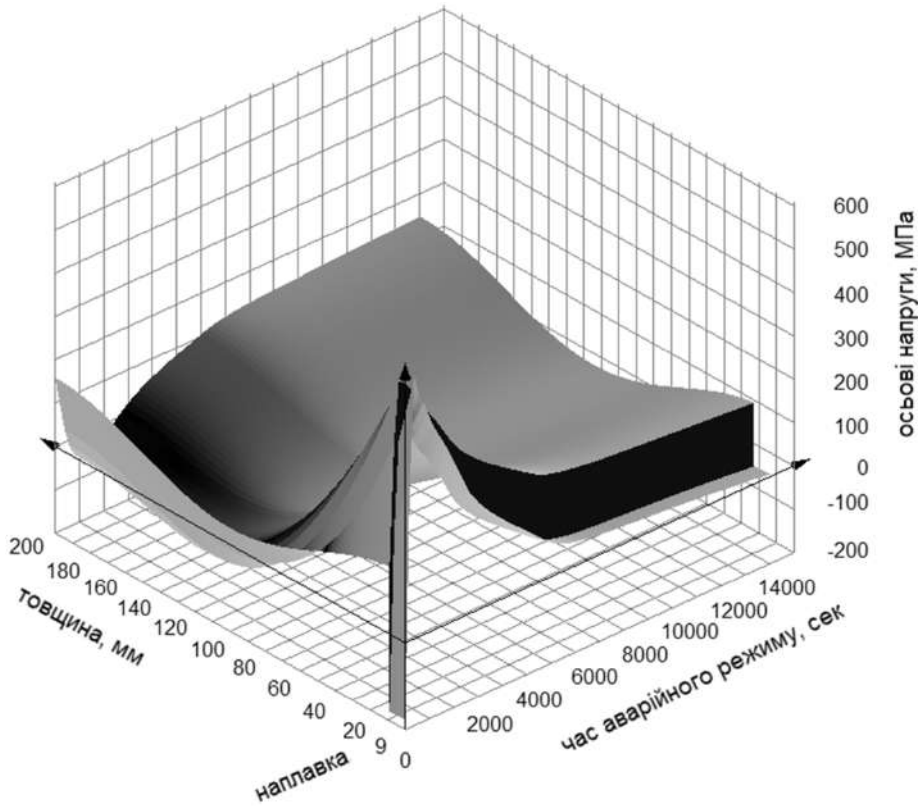


Рис. 9. Зміна осьових напружень металу КР для аварійного режиму «22.10.85»: поверхня осьових напружень в осях «товщина стінки-час АС-осьові напруження»

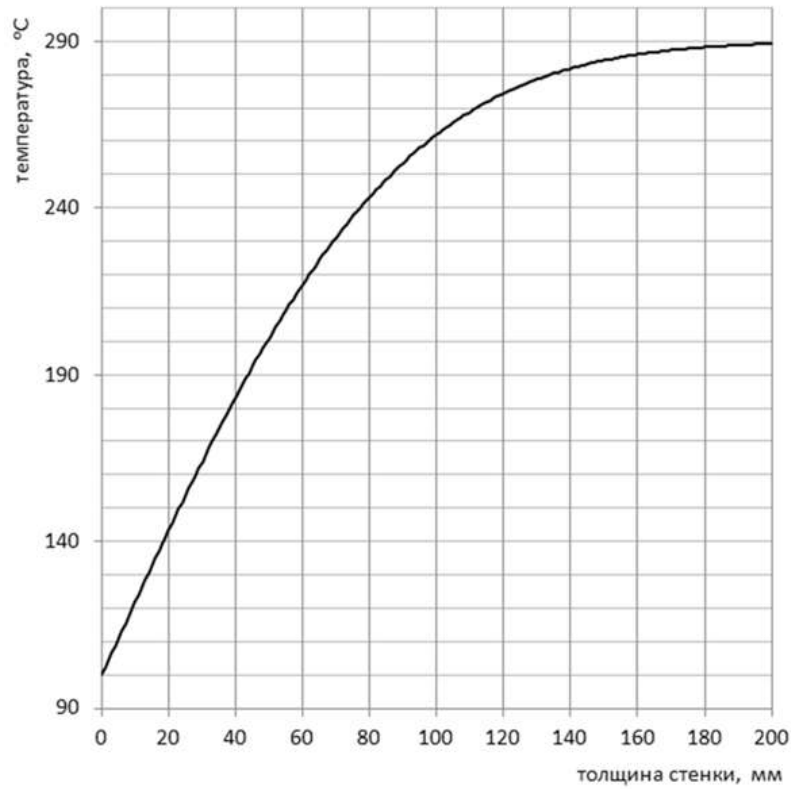


Рис. 10. Графік температури  $T(t)$ °C через стінку КР на 380-й сек режиму «22.10.85»

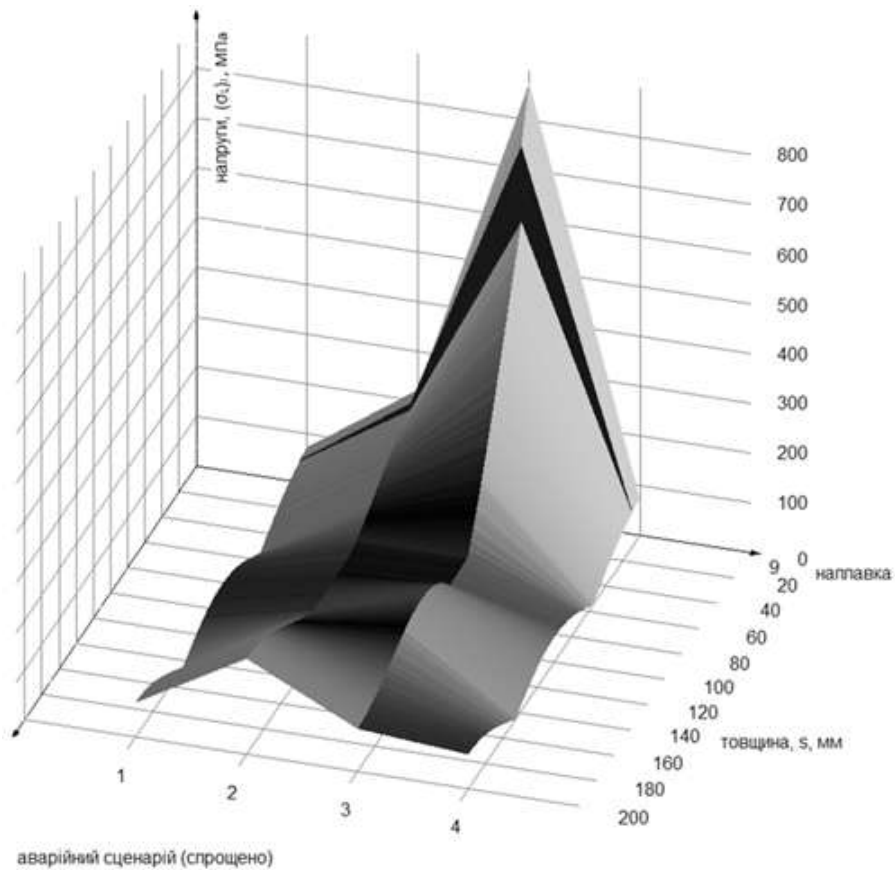


Рис. 11. Поверхня зміни приведених напружень ( $\sigma_1$ ) в координатних осях «товщина стінки-послідовність режимів НУЕ→АС-приведені напруження»

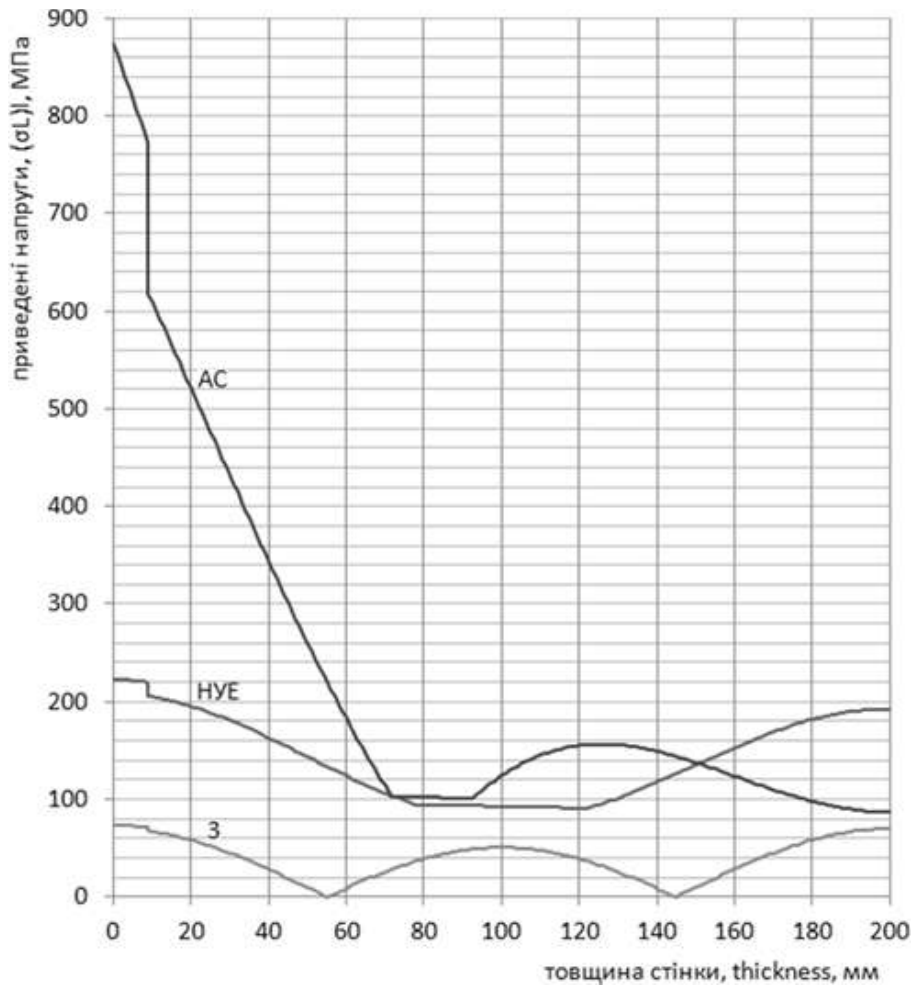


Рис. 12. Графік зміни приведених напружень ( $\sigma_L$ ) в координатних осях «товщина стінки - приведені напруження»

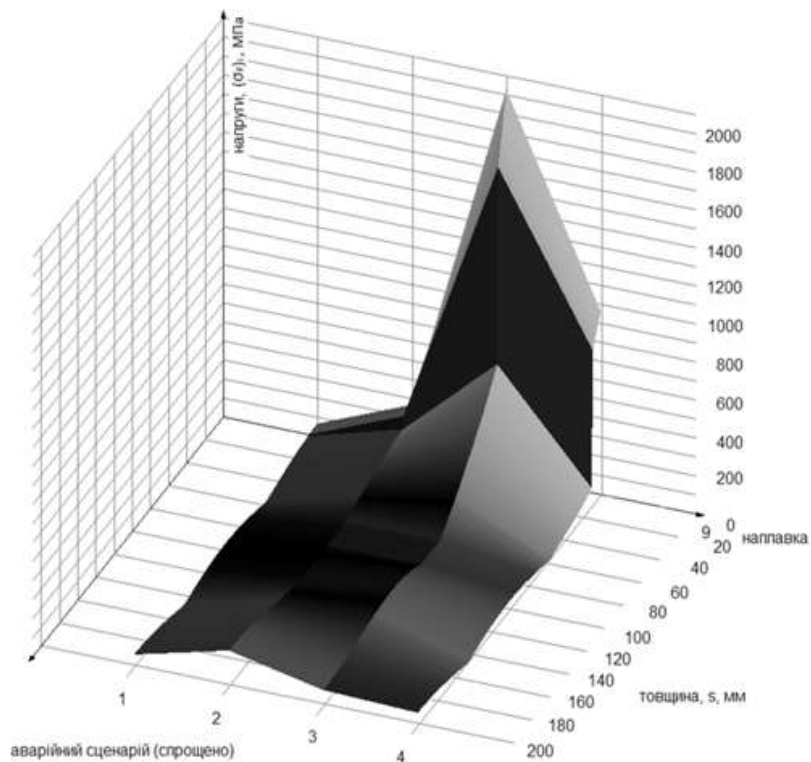


Рис. 13. Поверхня зміни умовних пружних приведених напружень ( $\sigma_F$ ) в координатних осях «товщина стінки - послідовність режимів HVE→AC - приведені напруження»

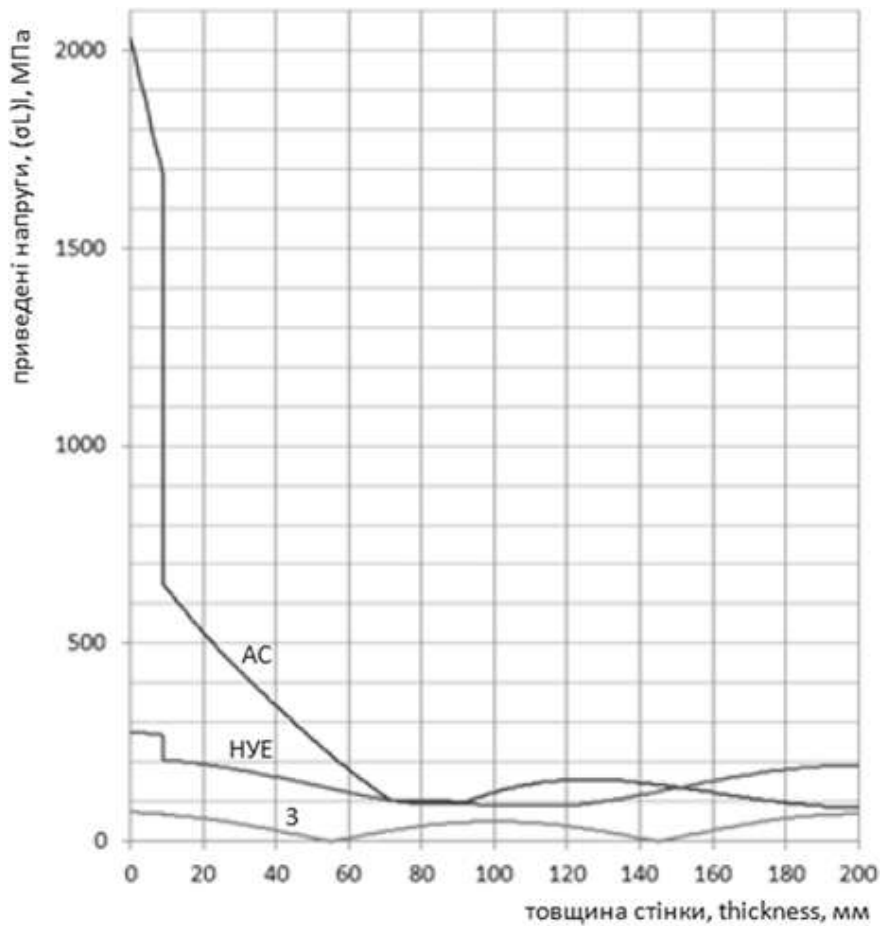
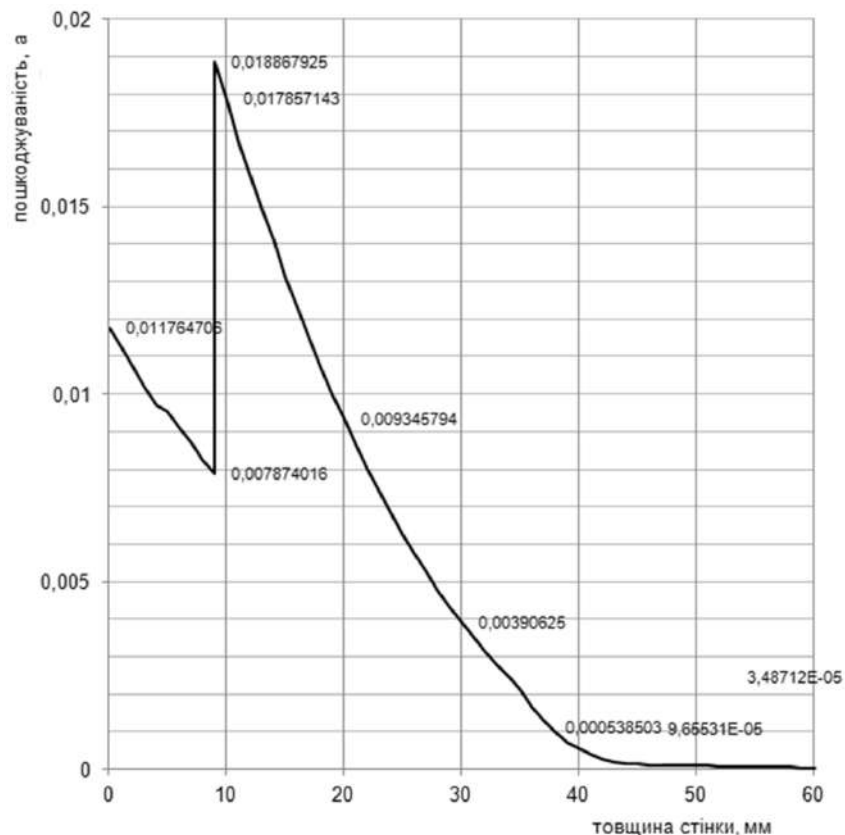
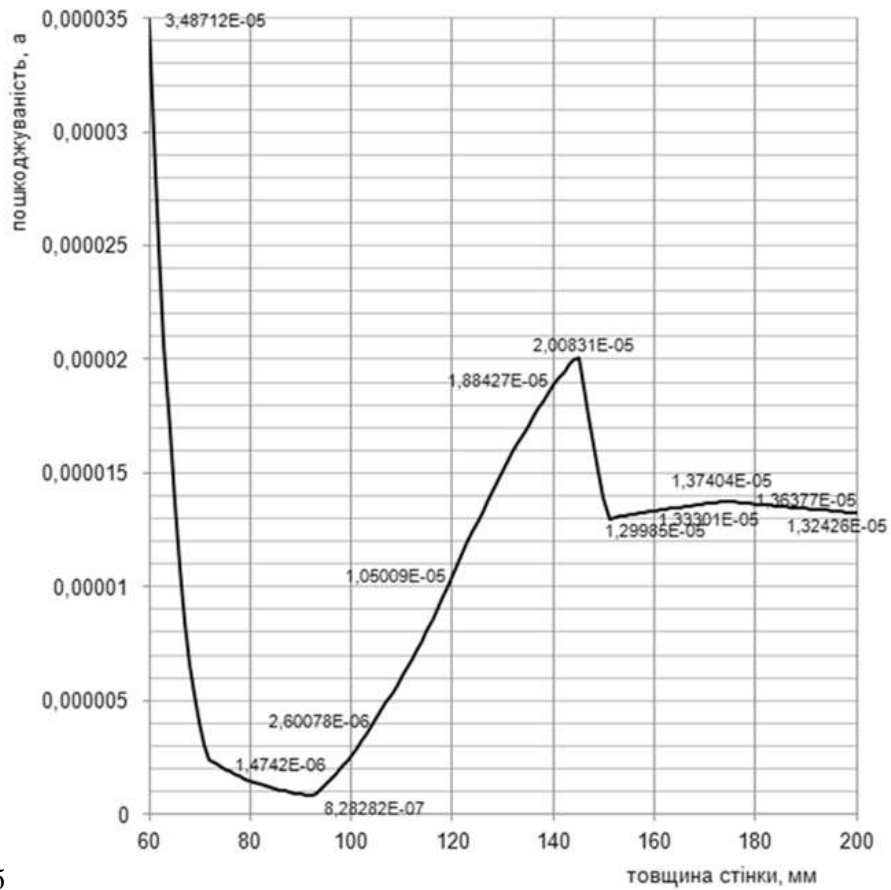


Рис 14. Графік зміни умовних пружних приведених напружень ( $\sigma_r$ ) в координатних осях «товщина стінки - приведені напруження».



а

Рис. 15. Циклічна пошкоджуваність для блоку навантажень «НУЕ→АС <22.10.85>» на рівні зварного з'єднання № 3 КР для товщини від 0 мм до 60 мм



б

Рис. 16. Циклічна пошкоджуваність для блоку навантажень «НУЕ→АС «22.10.85»» на рівні зварного з'єднання № 3 КР для товщини від 60 мм до 200 мм

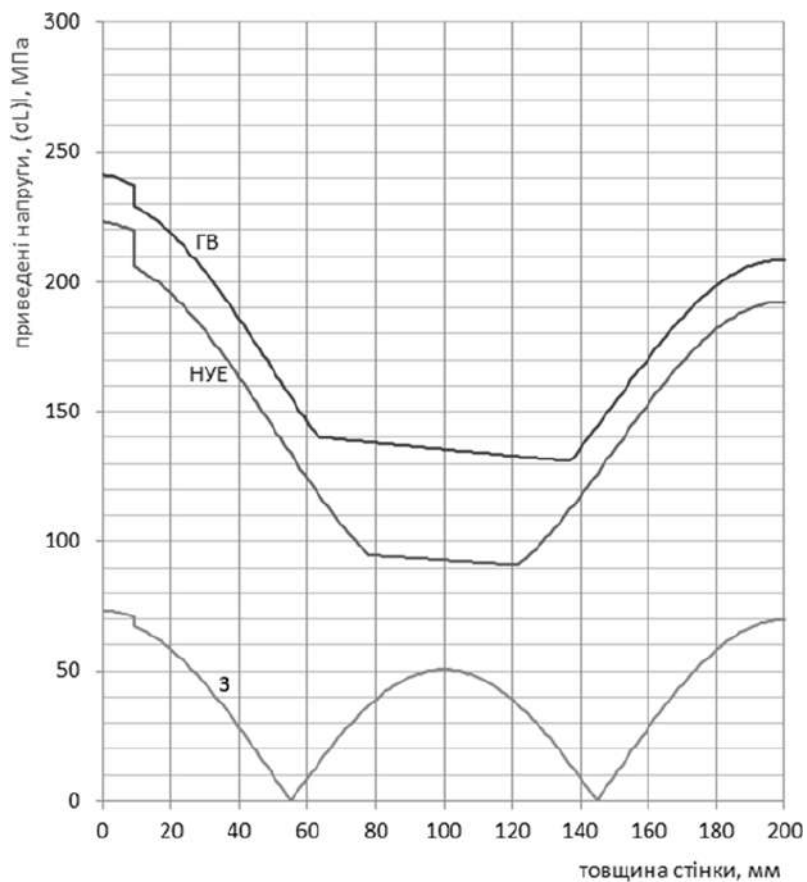


Рис. 17. Графік зміни приведених напружень (σ<sub>т</sub>) в координатних осях «товщина стінки - приведені напруження»

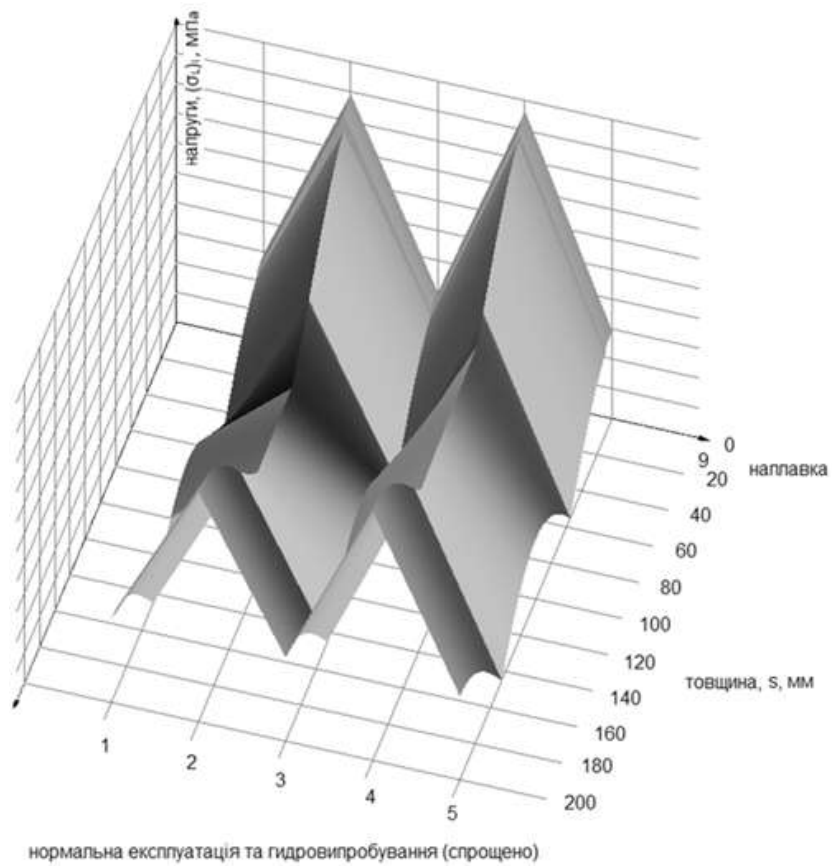
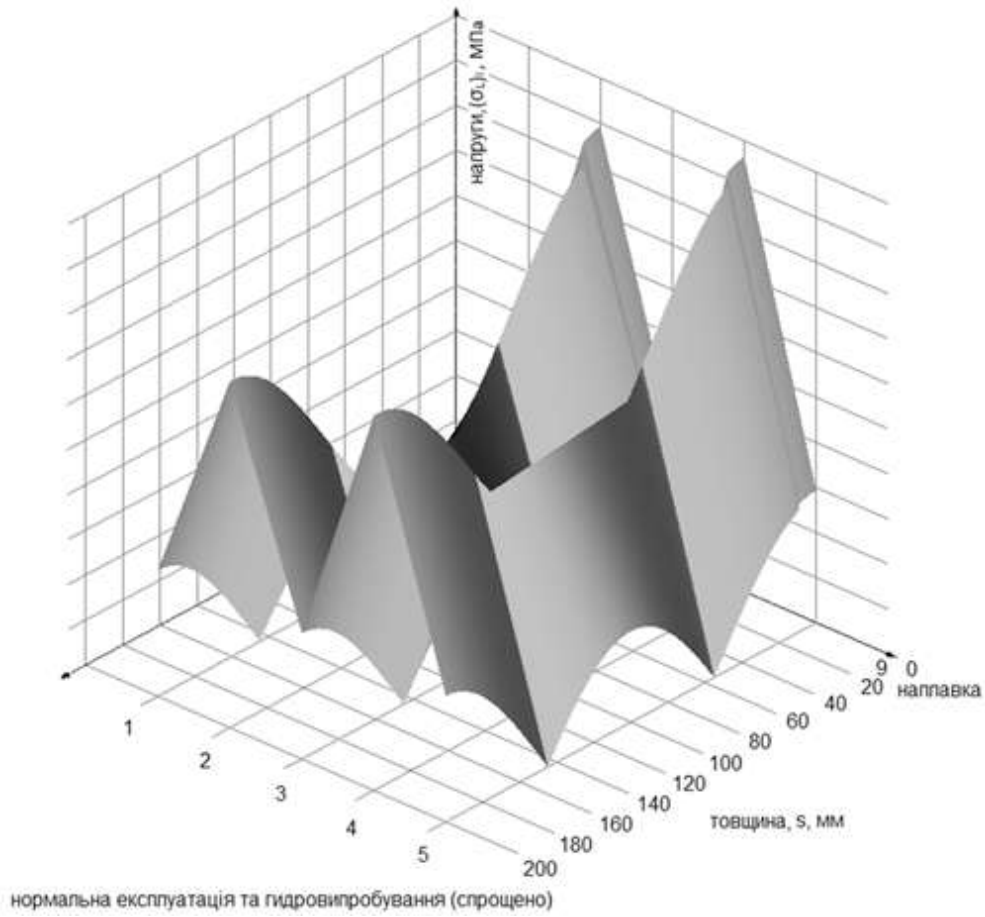
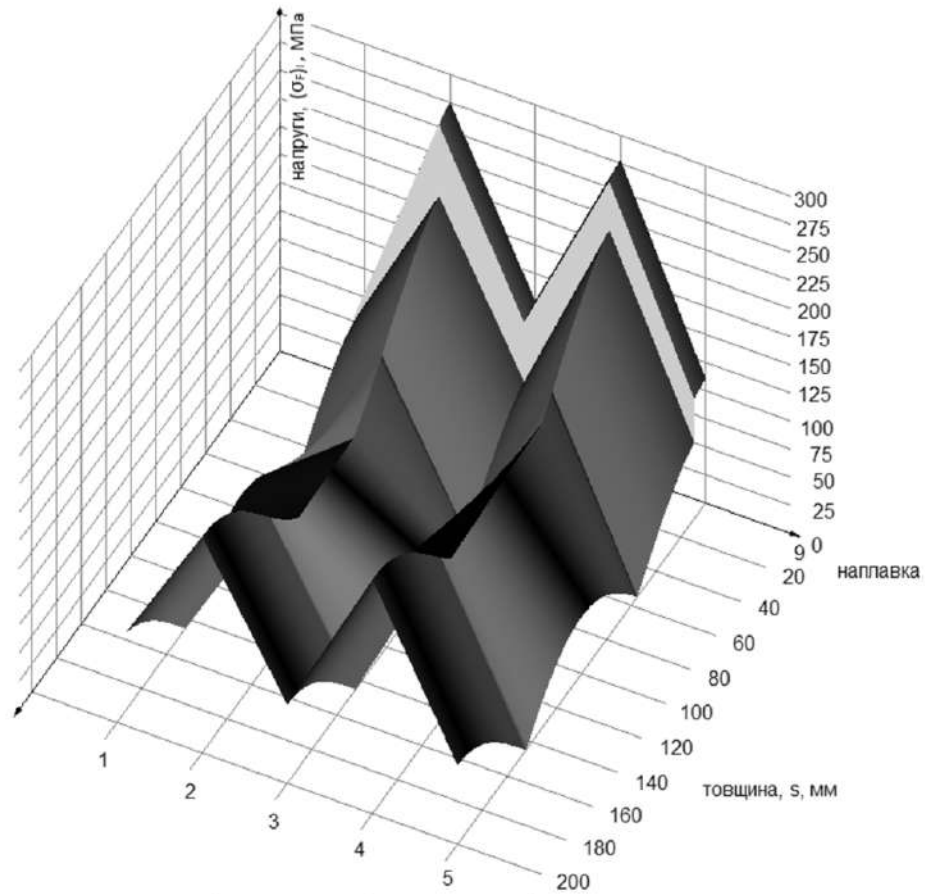
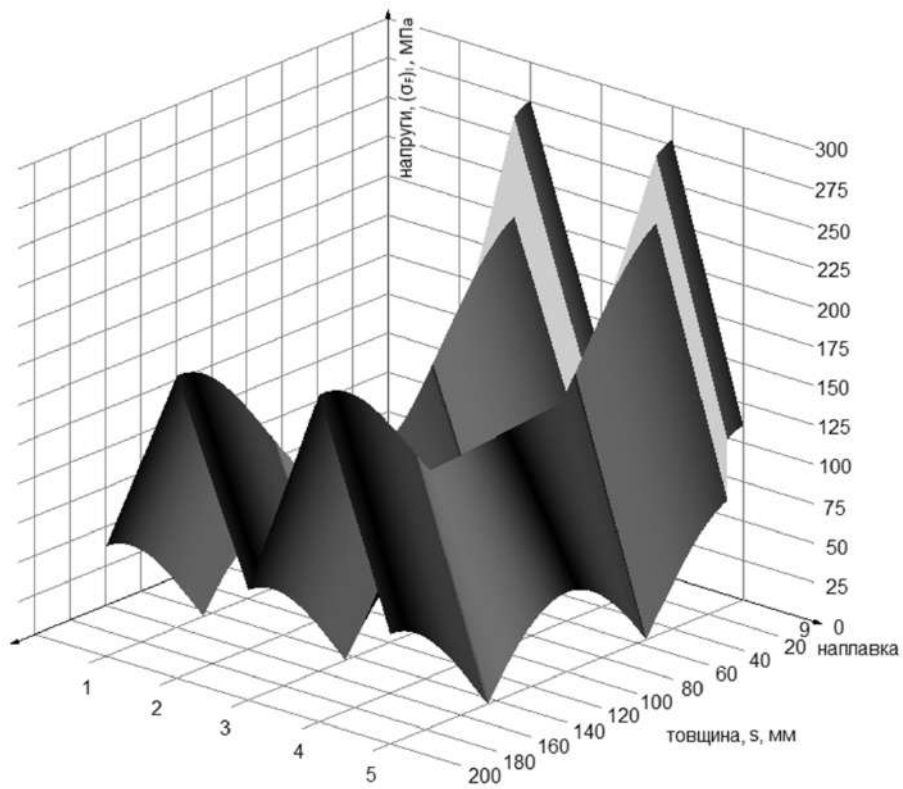


Рис. 18. Поверхня зміни приведених напружень ( $\sigma_1$ ) в координатних осях «товщина стінки-послідовність режимів НУЕ→ГВ-приведені напруження» (дві проєкції)



нормальна експлуатація та гидровипробування (спрощено)



нормальна експлуатація та гидровипробування (спрощено)

Рис. 19. Поверхня зміни умовних пружних приведених напружень ( $\sigma_F$ ) в координатних осях «товщина стінки - послідовність режимів НУЕ→ГВ - приведені напруження» (дві проєкції)



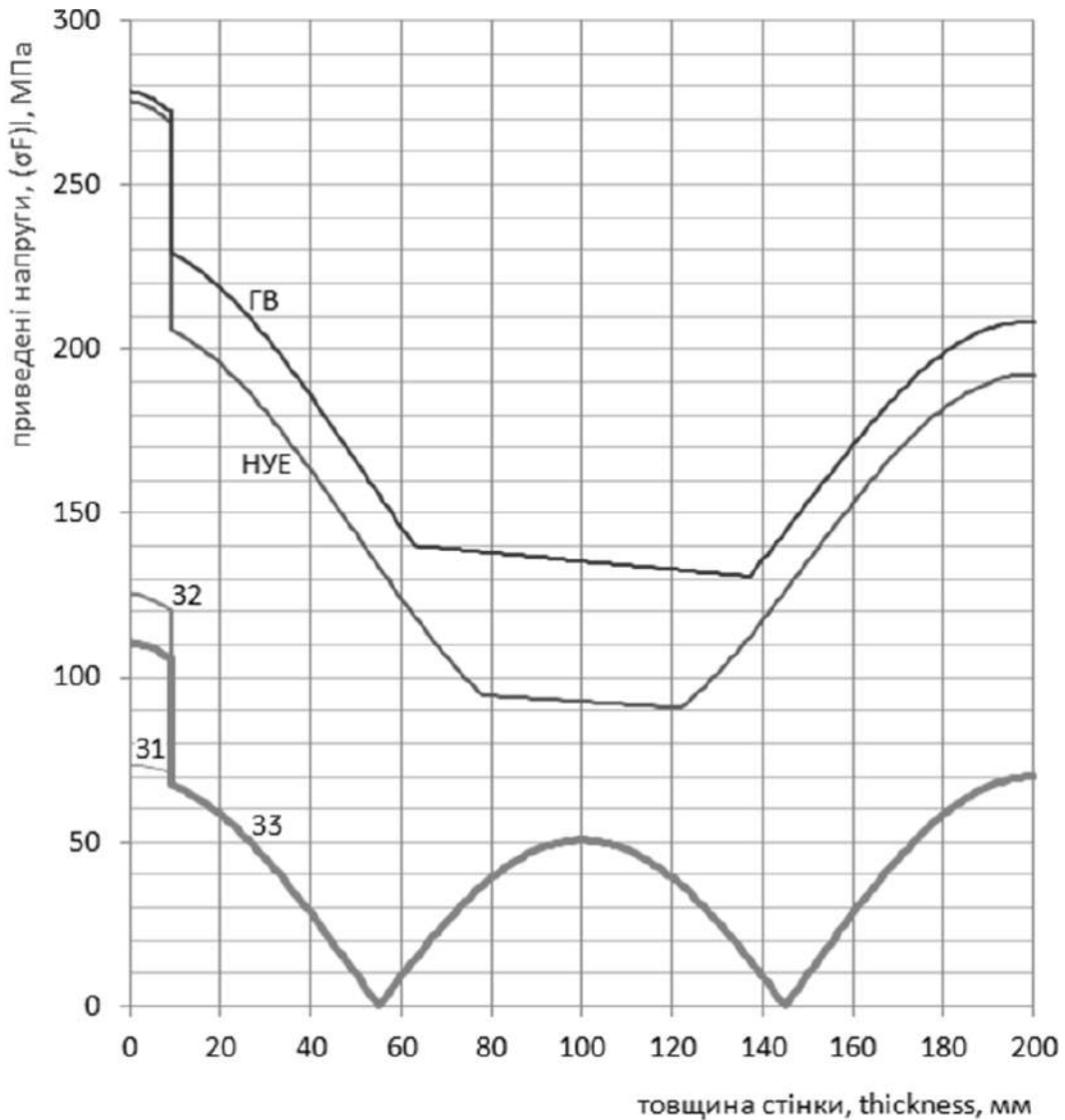
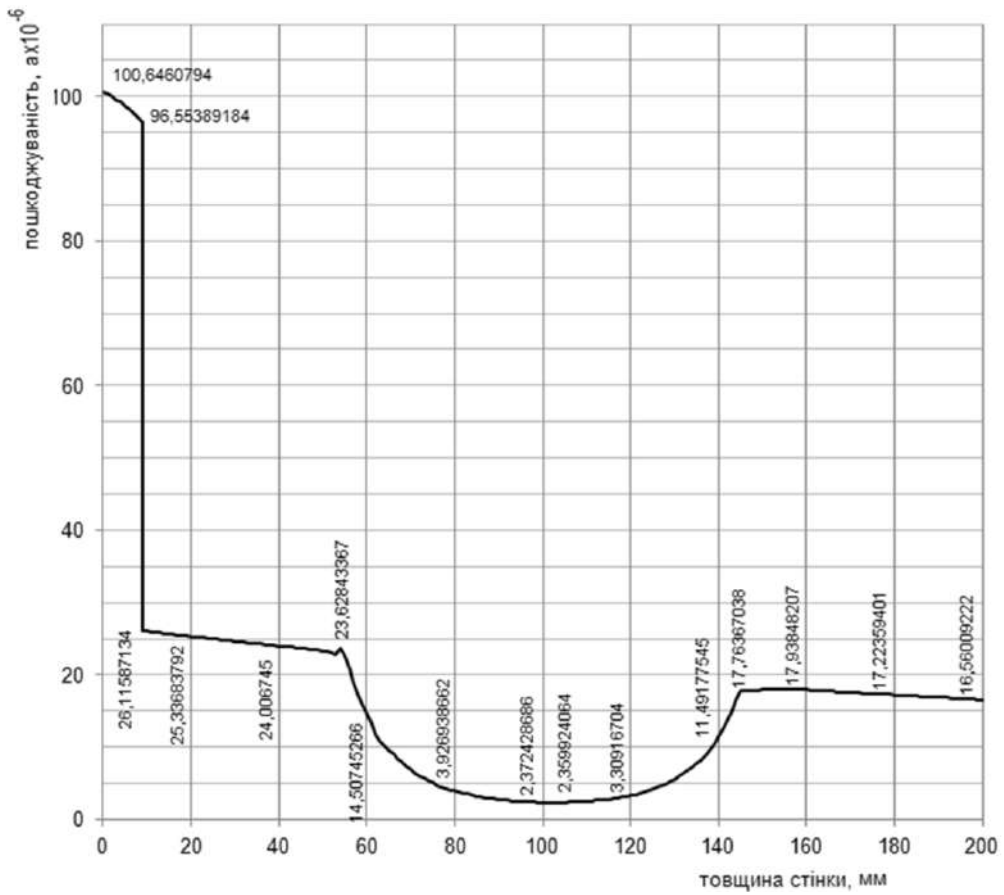


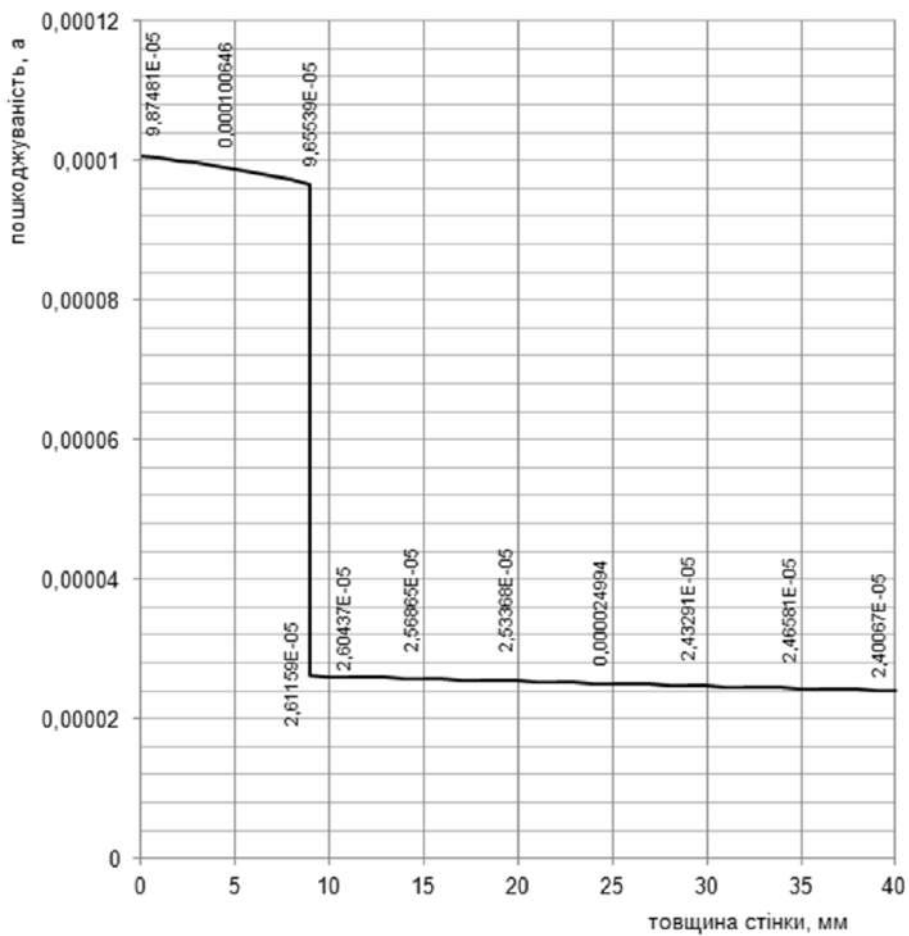
Рис. 20. Графік зміни умовних пружних приведених напружень ( $\sigma_F$ ) в координатних осях «товщина стінки - приведені напруження».

### References

1. Normy rozrakhunku na mitsnist obladnannia ta truboprovodiv atomnykh enerhetychnykh ustanovok PNAE H-7-002-86.
2. International Atomic Energy Agency, "Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants". *IAEA-EBP-WWER*. 2006. No. 8. Rev.1.
3. Glinka G. "Development of weight functions and computer integration procedures for calculating stress intensity factors around cracks subjected to complex stress fields". *Progress Report: Stress and Fatigue-Fracture Design*, Petersburg, Ontario, Canada. 1996. No. 1. URL: [https://www.afgrow.net/downloads/documents/SaFFd\\_1m.pdf](https://www.afgrow.net/downloads/documents/SaFFd_1m.pdf)
4. Chyrko L. I. "Porivniannia ukrainskoho ta rosiiskoho pidkhodiv do vyznachennia parametriv okrykhchuvannia metalu korpusiv reaktoriv". *Tezy dopovidei XIX shchorichnoi naukovoï konferentsii Instytutu yadernykh doslidzhen NAN Ukrainy 24 - 27 sichnia 2012 r. Kyiv, Ukraina*. P. 95-96. URL: [http://www.kinr.kiev.ua/Annual\\_Conferences/KINR2012/pdf/KINR\\_Conference\\_2012.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2012/pdf/KINR_Conference_2012.pdf)
5. Simonov E. Ya. "Prodlenie sroka ekspluatatsii reaktornykh ustanovok AES, vyrabotavshikh resurs, sooruzhenie novykh AES – opasnaia tekhnicheskaiia avantiura". *Atomna enerhetyka v Ukraini*. 2007 URL: <https://atom.org.ua/?p=159>
6. Kuznetsov H. V., Sheremet M. A. *Raznostnye metody resheniia zadach teploprovodnosti: uchebnoe posobie*. Yzd-vo TPU, 2007.
7. Gumen O., Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. "Geometric Representation of Turbulent Macrostructure in 3D Jets" *ICGG 2018 – Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics. ICGG 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 809. P.739-745.



а



б

Рис. 21. Циклічна пошкоджуваність для одного блоку навантажень «НУЕ→ГВ» на рівні зварного з'єднання № 3 КР: а) для всієї товщини стінки; б) для товщини від 0 мм до 40 мм

Таблиця 2

Результати оцінювання циклічної пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 КР для терміну експлуатації 30 років

Точки зварювального з'єднання	Тривалість експлуатації КР			
	30 років			
Внутрішня поверхня стінки КР	$a^{AEC}_{HVE, GB, ПНВЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_1 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,012	0,011764706	<b>0,023764706</b>
	min	0,011	0,011764706	<b>0,022764706</b>
	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus GB}$	$a^{AEC}_{ПНВЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_2 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,00301938	0,00898062	0,011764706
		0,00798062		<b>0,022764706</b>
Між основним металом і наплавкою	$a^{AEC}_{HVE, GB, ПНВЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_1 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,005	0,018867925	<b>0,023867925</b>
	min	0,005	0,018867925	<b>0,023867925</b>
	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus GB}$	$a^{AEC}_{ПНВЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_2 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,000783477	0,004216523	0,018867925
		0,004216523		<b>0,023867925</b>
Зовнішня поверхня стінки КР	$a^{AEC}_{HVE, GB, ПНВЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_1 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,002	0,000013243	<b>0,002013243</b>
	min	0,002	0,000013243	<b>0,002013243</b>
	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus GB}$	$a^{AEC}_{ПНВЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_2 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,000496803	0,001503197	0,000013243
		0,001503197		<b>0,002013243</b>

Таблиця 3

Результати оцінки циклічної пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 КР для терміну експлуатації 40 років

Точки зварювального з'єднання	Тривалість експлуатації КР			
	40 років			
Внутрішня поверхня стінки КР	$a^{AEC}_{HVE, GB, ПНВЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_1 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,019	0,011764706	<b>0,030764706</b>
	min	0,018	0,011764706	<b>0,029764706</b>
	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus GB}$	$a^{AEC}_{ПНВЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_2 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,00402584	0,01497416	0,011764706
		0,01397416		<b>0,029764706</b>
Між основним металом і наплавкою	$a^{AEC}_{HVE, GB, ПНВЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_1 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,009	0,018867925	<b>0,027867925</b>
	min	0,008	0,018867925	<b>0,026867925</b>
	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus GB}$	$a^{AEC}_{ПНВЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_2 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,001044636	0,00795536	0,018867925
		0,00695536		<b>0,026867925</b>
Зовнішня поверхня стінки КР	$a^{AEC}_{HVE, GB, ПНВЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_1 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,004	0,000013243	<b>0,004013243</b>
	min	0,004	0,000013243	<b>0,004013243</b>
	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus GB}$	$a^{AEC}_{ПНВЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{HVE \ominus AC} "22.10.85"$	$a_2 \text{ нідхід} = \Sigma a_i$
	max	0,000662404	0,003337596	0,000013243
		0,003337596		<b>0,004013243</b>

Таблиця 4

Результати оцінювання циклічної пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 КР, термін експлуатації 60 р.

Точки зварювального з'єднання	Тривалість експлуатації КР			
	60 років			
Внутрішня поверхня стінки КР	$a^{AEC}_{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus АС"22.10.85"}$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$
	max	0,031283	-	0,011764706
	min			
	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus ГВ}$	$a^{AEC}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus АС"22.10.85"}$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$
	max	0,00603876	0,02524424	0,011764706
Між основним металом і наплавкою	$a^{AEC}_{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus АС"22.10.85"}$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$
	max	0,014249	-	0,018867925
	min			
	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus ГВ}$	$a^{AEC}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus АС"22.10.85"}$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$
	max	0,001566954	0,012682	0,018867925
Зовнішня поверхня стінки КР	$a^{AEC}_{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus АС"22.10.85"}$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$
	max	0,006469	-	0,000013243
	min			
	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus ГВ}$	$a^{AEC}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Оцінка}_{НУЕ \ominus АС"22.10.85"}$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$
	max	0,000993606	0,005475	0,000013243
min				

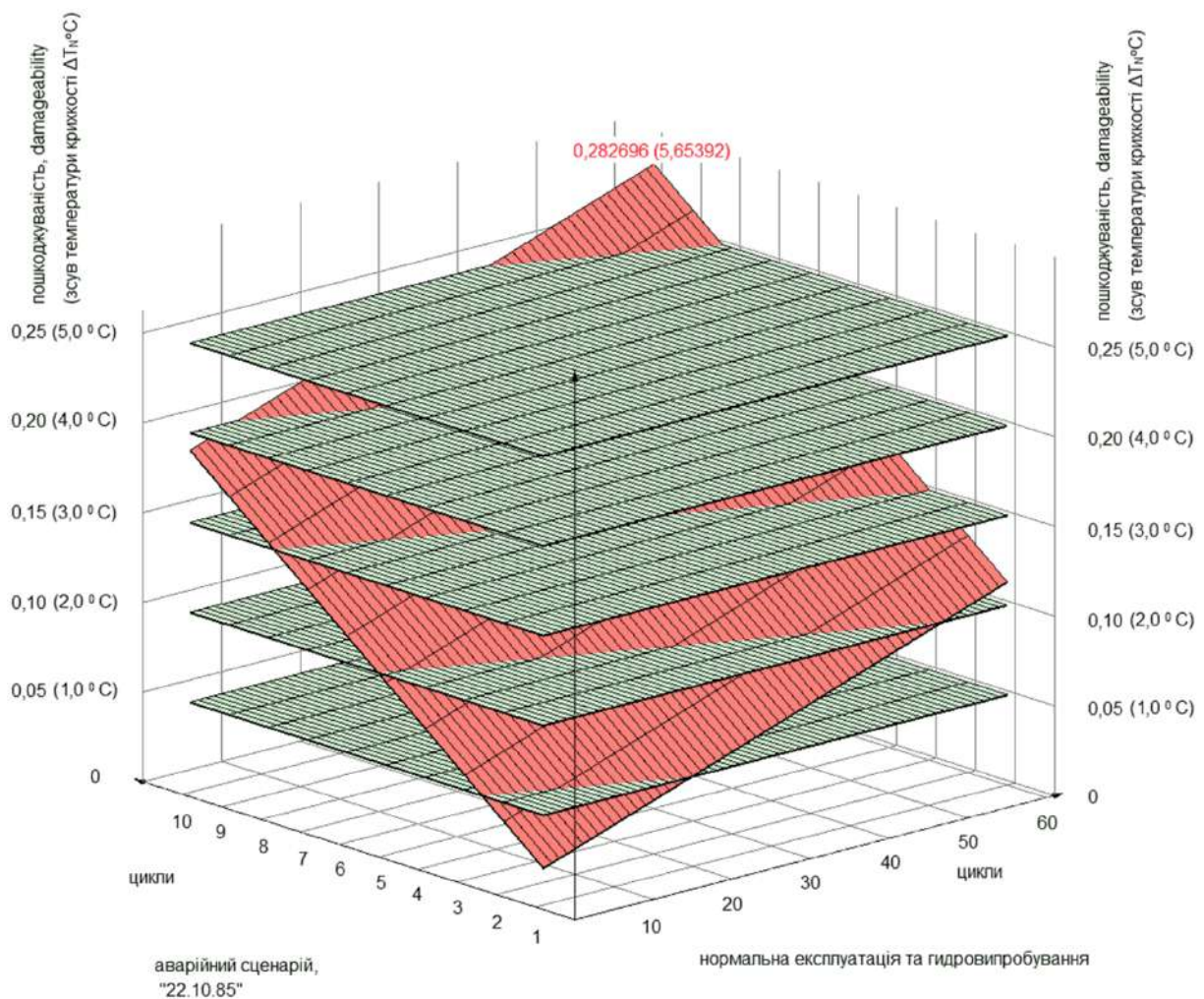


Рис. 22. Загальний вплив на зростання циклічної пошкоджуваності (та на зсув температури  $\Delta T_N$ ) режимів НУЕ, ГВ та АС «22.10.85»

УДК 621

## Экспертная экспресс-оценка влияния тепломассообменных процессов на остаточный ресурс корпуса реактора ВВЭР-1000 из-за циклической повреждаемости

В. В. Попов<sup>1</sup>, В. О. Милейковский<sup>2</sup>, О. С. Тригуб<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ст.наук.сотрудник НИЧ, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, v.v.popov.1962@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3396-0951

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, v\_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>3</sup>к.ф-м.н., доц., “Национальный университет “Киево-Могилянская академия”, г. Киев, Украина, as\_trigub@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-6573-2814

*Аннотация. Украина остается страной, которая зависит от атомной энергетики, как для теплоснабжения городов-спутников, так и для электроснабжения. В городах, близких к атомным электростанциям, целесообразно электрическое отопление от производимой ими электроэнергии. С другой стороны, Украина – единственное государство в мире, где произошла наиболее тяжелая авария на атомной электростанции – на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС в ночь на 26 апреля 1986 года. Другой отличительной особенностью атомной энергетики Украины является значительное количество энергоблоков с исчерпанным проектным ресурсом – так называемых «старых» энергоблоков. Износ их связан с влиянием тепломассообменных процессов, приводящих к периодической температурной деформации элементов, вызывающих циклическую повреждаемость. Приведен пример экспертной экспресс-оценки остаточного ресурса конкретного корпуса реактора ВВЭР-1000 с учётом совместного действия нестационарных тепломассообменных и механических процессов. Выполнен развернутый экспресс-расчет циклической (усталой) повреждаемости металла корпуса реактора ВВЭР-1000 в результате опасного аварийного режима.*

*Ключевые слова: атомная электростанция, тепломассообменные процессы, температурная деформация, циклическая повреждаемость.*

УДК 621

## Expert Express Assessment of the Impact of Heat and Mass Transfer Processes on the Residual Life of the WWER-1000 Reactor Vessel Due to Cyclic Damage

V. Popov<sup>1</sup>, V. Mileikovskiy<sup>2</sup>, O. Tryhub<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Senior Research Fellow, Research Part, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, v.v.popov.1962@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3396-0951

<sup>2</sup>Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, v\_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, “National University “Kyiv-Mohyla Academy”, Kyiv, Ukraine, as\_trigub@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-6573-2814

*Abstract. Ukraine remains a country dependent on nuclear energy for both heat supply and satellite supply. In cities close to nuclear power plants, electric heating from the electricity they produce is appropriate. On the other hand, Ukraine is the only country in the world where the worst accident at a nuclear power plant occurred at the Chernobyl NPP Unit 4 on the night of April 26, 1986. Another characteristic feature of Ukraine's nuclear energy is the significant number of power units with exhausted project resources - the so-called "old" power units. Their wear is associated with the influence of heat and mass transfer processes, which lead to periodic thermal deformation of the elements, which causes cyclic damage. An example of expert rapid assessment of the residual life of a specific reactor vessel WWER-1000 is given taking into account the combined action of non-stationary heat and mass transfer and mechanical processes. A detailed express calculation of cyclic (tired) damage to the metal of the WWER-1000 reactor vessel due to the dangerous emergency mode has been performed. The WWER-1000 reactor is the last most widespread and most powerful water-water nuclear reactor of the former USSR, operated on 13 of the 15 operating power units of Ukrainian nuclear power plants (NPPs) - Zaporizhia, Rivne, Khmelnytsky and South Ukraine (SUNPP). The reactor is the most important indispensable element of a nuclear power plant, which determines its safety and resource. Given the design resource and the dates of commissioning of Ukrainian NPP units, the issue of rapid expert assessment of the technical condition of WWER-1000 hulls is quite relevant. Of course, modern engineering has the full range of tools needed to perform such estimates, from powerful computers to advanced computing software. But the known and inevitable costs of modern engineering - complex and time-consuming*

*modeling and calculations. Experience has shown that a certain "reasonable" combination of the use of relatively simplified "light" calculation methods allows us to assess the safety, strength and service life of WWER-1000 reactors very quickly and with the necessary accuracy acceptable for expert opinion. The publication considers as an example the real emergency situation of October 22, 1985 and the WWER-1000 reactor of SUNPP Unit 1. Since this emergency situation led to rapid cooling of this reactor, the calculation of the effect of cyclic damage of reactor steel on the strength and reliability of the reactor vessel is shown. This example and the consideration of the real emergency situation demonstrates the effectiveness and acceptability of the use of estimated expert rapid assessments to accurately determine the reliability and safety of such critical elements of nuclear power plants as nuclear reactor buildings.*

*Key words: nuclear power plant, heat and mass transfer processes, temperature deformation, cyclic damage.*

Надійшла до редакції / Received 15.09.2021

УДК 697.432

## Підвищення ефективності спалювання твердого палива в шарі

М. П. Сенчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

**Анотація.** Проаналізовано основні напрямки підвищення ефективності роботи твердопаливних теплогенераторів. Відмічено, що в промислових зразках теплогенераційних установок залежно від їхнього класу застосовуються різного рівня за капітальними й експлуатаційними витратами технологічні схеми спалювання твердого палива. Наведено приклади реалізації таких технологічних схем спалювання на підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень у конструкціях твердопаливних теплогенераторів. У роботі запропоновано конструктивну схему теплогенератора невеликої потужності з комбінованою технологією двокамерного спалювання твердого палива, у якій поєднано шаровий (або шахтно-шаровий) процес горіння зі спалюванням в об'ємі: в первинній камері згорання над шаром палива, що горить на колосниковій решітці, та у вторинній циклонній камері (або камерах). Завдяки вихровому руху в футерованій вторинній камері високотемпературних газів з умістом твердих частинок, винесених потоком із зони горіння первинної камери, відбувається як допалювання горючих речовин, так і сепарація зольних частинок з відведенням їх до зольника теплогенератора. Така технологія спалювання дозволяє також підвищити форсування горіння шару на колосниковій решітці, підвищити стабільність процесу, зменшити габарити конструкції. Підвищення ефективності роботи твердопаливного теплогенератора з двокамерною топкою досягається завдяки зменшенню втрат теплоти з механічною неповнотою згорання вуглецевих частинок у відвідних газах, а також зниження концентрації зольних частинок у потоці газів на вході конвективних теплообмінних поверхонь і, відповідно, підвищення їхньої теплової ефективності. Це підтверджено розрахунковими залежностями ефективності роботи механізованого твердопаливного теплогенератора за різних технологічних схем спалювання твердого палива.

**Ключові слова:** твердопаливний теплогенератор, технологічна схема спалювання, первинна і вторинна камери згорання, циклонна камера згорання, двокамерна топка, тверде паливо

**Вступ.** З метою зменшення витрат на виробництво теплової енергії, а також з урахуванням дефіциту якісного палива [1-6] розвиток вітчизняної котлової техніки комунальної енергетики направлено на заміщення дорогих видів палива на дешевші нижчої якості. Водночас, ефективне використання низькосортного палива потребує удосконалених технологій спалювання.

Твердопаливні теплогенератори невеликої потужності до 4 МВт експлуатуються переважно зі спалюванням палива в шарі. Здебільшого це викликано простотою експлуатації за можливості підтримання стійкого процесу горіння в широкому діапазоні навантажень. Обмеження діапазону регулювання потужності задаються вимогами до екологічних показників.

Раціональні напрямки у підвищенні коефіцієнта корисної роботи теплогенераційних установок при використанні дешевого низькосортного палива:

- застосування схем організації процесу спалювання, зокрема механізованого, за видом палива з відповідними характеристиками;
- позонне регулювання первинного і вторинного дуттьового повітря із заданим співвідношенням між витратами;
- глибоке очищення відвідних газів за межа-

ми установки;

- комбінування різних схем організації подачі палива і повітря та різних способів спалювання.

У роботі пропонується комплексна схема організації спалювання твердого палива за поєднання в конструкції твердопаливного теплогенератора спалювання палива в шарі, в об'ємі топкової камери та у вихровому потоці циліндричної камери згорання.

**Актуальність дослідження.** Підвищення ефективності спалювання твердого палива, зокрема низькосортного, в теплогенераторах невеликої потужності комунальної енергетики за організації комплексної технологічної схеми топкового процесу горіння палива в шарі і об'ємі дозволяє максимально використовувати місцеве паливо.

**Останні дослідження та публікації.** Розвитку котельної техніки за напрямом використання твердого палива в комунальній теплоенергетиці присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт [1-11]. Наукові праці враховують тенденцію останніх десятиліть щодо підвищених вимог до економічних і екологічних показників роботи джерел теплової енергії і направлені як на удосконалення наявних, так і створення нових конструкцій твердопаливних теплогенераторів невеликої по-

тужності.

Можна відмітити такі основні напрямки покращення теплотехнічних і екологічних показників роботи твердопаливних теплогенераторів:

- використання попередньо підготовленого якісного твердого палива: паливні гранули, брикети, розсортоване вугілля;
- комплексна механізація всіх стадій топкового процесу;
- регульовані системи зонного розподілення у потрібному співвідношенні первинного і вторинного дуттьового повітря;
- механічне очищення теплообмінних поверхонь з потрібною частотою під час експлуатації установок;
- застосування систем глибокого очищення відхідних газів;
- удосконалення конструктивних і режимних параметрів зони горіння технологічних схем теплогенераторів;
- застосування комбінованих схем спалювання тощо.

Вибір напрямку підвищення ефективності роботи теплогенераторів залежить як від нормативних вимог за відповідним класом, наявного палива, умов експлуатації тощо, так і від капітальних витрат на впровадження та експлуатацію теплогенераторів.

Одним з прикладів дорогих технологій спалювання є використання якісного попередньо підготовленого палива за комплексної механізації всіх стадій процесу горіння. Серед відомих зразків такого класу може бути конструкція водогрійних твердопаливних котлів «Світлобор» потужністю до 750 кВт зі спалюванням в автоматичному режимі пелет і тріски (рис.1,[12]). Така технологія спалювання передбачає механізовані і регульовані системи:

- паливоподачі в бункер котла, а далі через шлюзову протипожежну камеру в ретортний пальник;
- розподілення первинного і вторинного повітря;
- очищення конвективних теплообмінних поверхонь від золошлакових відкладень;
- очищення решітки від шлаку;
- сухе очищення відхідних газів від твердих частинок;
- видалення золи і шлаку.

Конструкції твердопаливних котлів з комплексною автоматизацією всіх механізованих технологічних процесів забезпечує високі показники роботи на якісному паливі – коефіцієнт корисної дії перевищує 92 % на пелетах з вологістю до 5 % і зольністю до 0,5 %.

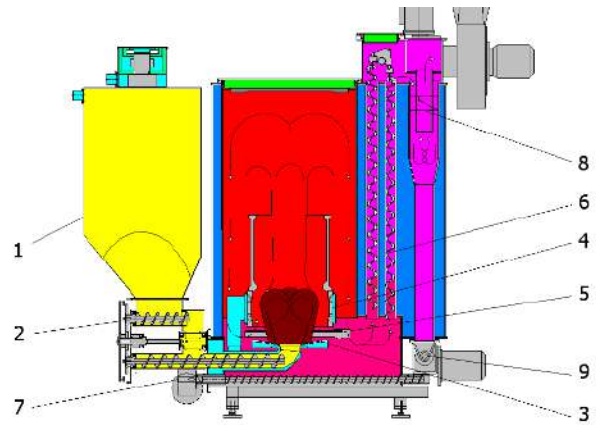


Рис. 1. Схема механізованого твердопаливного водяного котла «Світлобор»:

1 – бункер з пристроєм пневмоподачі пелет з паливного складу; 2 – живильник (шнек дозатора; протипожежний шлюз, шнек подачі в ретортний пальник; привід пристроїв); 3 – ретортний пальник з нагріванням первинного повітря; 4 – футерована камера згоряння з розподільним каналом і соплами вторинного повітря; 5 – пристрій для очищення колосникової решітки від шлаку; 6 – пристрій очищення димогарних труб; 7 – пристрій видалення золи з котла; 8 – мультициклон очищення відхідних газів від твердих частинок; 9 – пристрій видалення золи з мультициклона

Через дефіцит у країні якісного палива, наукові дослідження щодо розроблення конструкцій спрямовано на раціональне використання твердого палива в теплогенераторах з менш затратними технологіями. Водночас, спалювання без попереднього підготовлення рядового палива пов'язане зі збільшенням втрат теплоти з механічною неповнотою згоряння як зі шлаком та провалом  $q_4^{шп+пр}$ , так і з винесенням відхідними газами недогорілих частинок  $q_4^{внн}$ , а відповідно, зниженням коефіцієнта корисної дії теплогенератора.

Крім цього, зольні частинки сприяють утворенню відкладень на теплообмінних поверхнях зі зниженням коефіцієнта теплової ефективності. Вплив різних складових теплового балансу на сумарне зниження ефективності роботи котла неоднаковий. При спалюванні палива у щільному шарі переважають втрати  $q_4^{шп+пр}$ . Однак, при великому вмісті дрібних фракцій зростають втрати  $q_4^{внн}$ . Зниження їх у наявних конструкціях топків досягають за зменшення форсування шару, а відповідно, зниження потужності даного теплогенератора.

За переважного факельного способу спалювання сумарні втрати теплоти зростають в основному за рахунок зміни величини  $q_4^{внн}$  залежно від частки баласту в паливі (рис. 2, [10]). При зміні нижчої теплоти згоряння  $Q_n^r$  від 21,8 МДж/кг до 17,0 МДж/кг теплові втрати з механічною неповнотою згоряння  $q_4^{внн}$  зростають приблизно від 4,0 до 10,3 %.



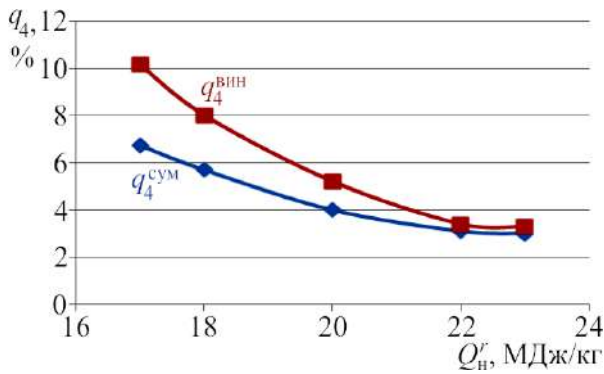


Рис. 2. Залежність втрат теплоти  $q_4$  від нижчої теплоти згоряння вугілля марки АШ в котлі ТП-100:  
 $q_4^{\text{сум}}$  – втрати теплоти з механічною неповнотою згоряння відносно тепловиділення суміші палив;  
 $q_4^{\text{внн}}$  – те ж твердого палива

Одним із радикальних заходів зниження втрат теплоти  $q_4^{\text{внн}}$  є збільшення висоти активної зони горіння в топковій камері залежно від якості спалюваного палива, за якої здійснюється більш повне вигорання вуглецю твердих частинок (рис. 3).

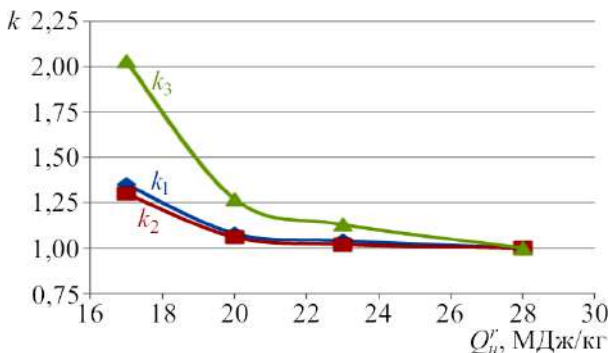


Рис. 3. Відносні розміри топкової камери котлів, розрахованих на спалювання вугілля різної якості:  
 $k_1$  – зони горіння;  $k_2$  – висоти топкової камери;  
 $k_3$  – об'єму топкової камери

Зниження теплоти згоряння палива впливає також на зміну поперечного перерізу топкової камери. Погіршення якості спалюваного палива і зниження його теплоти згоряння приблизно в 1,8 рази потребує збільшення висоти активної зони горіння майже в 1,7 рази а поперечний переріз топкової камери – в 1,6 рази. Відповідно загальний об'єм топкової камери зростає приблизно в 2,3 рази. Таким чином, обмеження на одиничну потужність котлів, крім факторів економічності, екологічності, аварійності маневреності, ремонтпридатності, ефективності використання капітальних вкладень та умов обслуговування і автоматизації, накладає погіршення якості спалюваного палива.

Висока ефективність використання низькосортного палива досягається у котлоагрегатах великої потужності киплячого шару, що ци-

ркулює, за новітніми технологіями термічного перероблення [2]. Особливість зниження втрат теплоти  $q_4^{\text{внн}}$  полягає в тому, що вугільні частинки спалюються з багаторазовою циркуляцією за рахунок виносного циклона. Така технологія «киплячого шару» вважається перспективною і для теплогенераторів невеликої потужності [7].

За напрямком даної роботи можна виділити наукові праці, у яких висвітлено шляхи досягнення ефективності роботи котлів завдяки вдосконаленню технологічних схем спалювання палива низької якості, зокрема застосування комбінованих схем спалювання. Покращення якості процесу горіння досягають завдяки поєднанню різних способів спалювання: шарового (в сталому або киплячому шарі) і об'ємного (факельного або циклонного). Рациональне спільне застосування схем організації горіння: шахтно-шарового, факельно-шарового, циклонно-факельного тощо з удосконаленими відповідними технологічними стадіями процесу дає можливість розширити діапазон спалюваного палива, зокрема низькосортного.

У механічній топці з шахтно-шаровою схемою горіння [1] ефективне спалювання різних видів палива досягається завдяки поєднанню шахтних процесів за протитечійною схемою (підготовки і газифікації палива, перетворення вихідного різнорідного палива в однорідний кокс) з шаровим процесом горіння палива за поперечною схемою на колосниковій решітці з допалюванням вогнищевих решіток у зоні ефективного механічного шурування. Ступінь форсування процесу горіння залежить від якості палива, зокрема вмісту дрібних фракцій менше 6 мм.

Паливо з великим вмістом пилових частинок рационально використовувати в котлах з факельно-шаровою схемою горіння ([9,11,14], рис. 4). У них здійснюється одночасне спалювання великих частинок у шарі на решітці, а дрібних фракцій у зваженому стані – в топковій камері. Суміщення механічної (основної) і пневмомеханічної подачі палива закидувачем до камери згоряння оптимізує об'ємне горіння пилових фракцій та горіння палива в тонкому шарі відповідної висоти на решітці для заданого теплового навантаження. Механізація видалення золи забезпечується ланцюговою решіткою зі зворотним ходом. З метою ефективнішого використання палива різної якості ланцюгову решітку обладнують шурувальною планкою для механічного розпушування шару, що горить. Також пропонується двоярусна топка з функцією розсортування рядового вугілля по фракціям за можливості форсування горіння в шарі [9].

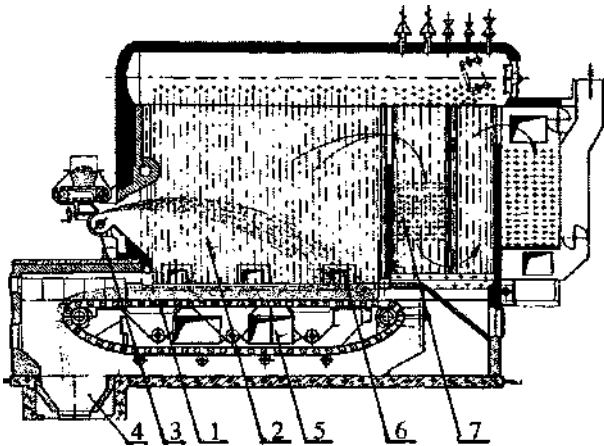


Рис. 4. Схема факельно-шарового спалювання твердого палива [9,11,14]:

1 – ланцюгова колосникова решітка зворотного ходу; 2 – топова камера; 3 – закидувач палива в топову камеру і на решітку; 4 – зольник; 5 – дуттьове повітря первинне; 6 – дуттьове повітря вторинне; 7 – конвективний пакет

Підвищення повноти вигорання пилових твердих частинок у факелі і зниження втрат теплоти з неповнотою згорання  $q_4^{вип}$  досягається за необхідних великих габаритів камери згорання, що прийнятне для котлів середньої і великої потужності.

Для теплогенераторів невеликої потужності комбіновані технологічні схеми спалювання реалізують в двокамерних топках, зокрема при заміщенні традиційних видів палива (газу, мазуту) твердим паливом з подальшим використанням існуючого котельного устаткування. У цьому випадку первинний і вторинний способи спалювання здійснюються в окремих топкових модулях, які стикуються на місці монтажу. Базовим модулем установки є котел-утилізатор, який включає вторинну топову камеру з факельним чи вихровим горінням, конвективний пакет, газохід. Первинна топова камера входить в конструкцію т. зв. передтопка, який включає також топовий пристрій, системи подачі і розподілення дуттьового повітря, паливоподачі, золовидалення та автоматизації керування роботою установки. Різноманітні конструкції передтопок призначені для ефективного використання окремих видів палива з відповідними теплофізичними характеристиками. Приклад компоновки виносної топки (передтопка) з котлом наведено на рис. 5 [4]. У передтопку з перештовхуючими колосниками можна використовувати забаластоване деревне паливо ( $W^r = 50-40\%$ ;  $A^r = 10-15\%$ ). У футерованій первинній топовій камері протікають основні процеси: сушіння і газифікація палива та горіння коксового залишку з утворенням високотемпературних газів з продуктами неповного згорання, допалювання яких здійснюється у вторинній камері факельного горіння.

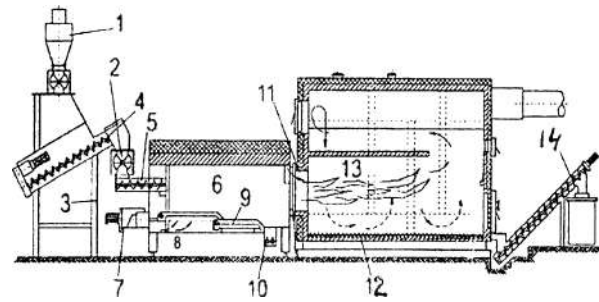


Рис. 5. Схема двокамерного спалювання твердого палива: 1 – бункер паливний; 2 – шлюзова камера; 3 – проміжний резервуар; 4 – шнек дозувальний; 5 – пристрій подачі палива на решітку; 6 – камера первинна; 7 – привод колосникової решітки 9 з рухомими і нерухомими колосниками; 8, 11 – дуттьове повітря: первинне, вторинне (попередньо підігріте); 10, 12, 14 – механічний пристрій видалення золи: з первинної камери, з вторинної камери, з теплогенератора; 13 – камера вторинна (топова)

Передтопок з нерухою колосниковою решіткою (рис. 6а, [5]) з повітряним охолодженням корпуса призначений для спалювання малозольного палива (тріски, тирси, брикетів тощо), зокрема вологого. Конструкція циклонного вертикального передтопка (рис. 6б, [6]) передбачає сумісне або окреме спалювання за двокамерною схемою природного газу і біомаси у вихровому потоці первинної камери з допалюванням у вторинній камері згорання.

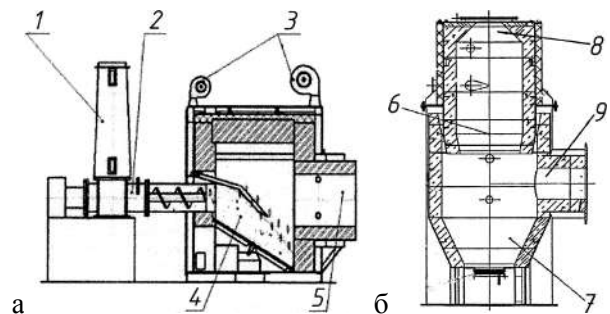


Рис. 6. Схеми передтопок для теплогенераторів з двокамерним спалюванням твердого палива:

- а) передтопок з нахиленою колосниковою решіткою;  
 б) передтопок – циклонний паличник; 1 – бункер паливний; 2 – пристрій шнековий подачі палива на решітку; 3 – вентилятори первинного і вторинного повітря; 4 – шар палива; 5 – вихід продуктів згорання у вторинну камеру; 6 – первинна топова камера; 7 – вторинна топова камера; 8 – амбразура газового паличника; 9 – вихід в котел-утилізатор

Конструктивна схема твердопаливного теплогенератора «Berkes» [13], крім циклонного передтопка на вході вторинної камери, включає газифікатор палива, гази піролізу з якого подаються в футеровану циліндричну камеру згорання передтопка з вихровим (спіралеподібним) факелом.

Такі модульні твердопаливні теплогенератори є ефективними при використанні різних видів палива відповідно до технологічної схеми передтопка, але є великогабаритними і

потребують великих площ для їх розміщення в котельних. Компактні теплогенераторів отримують за конструкції з вбудованими топковими камерами.

**Метою роботи** є розробка конструктивної схеми твердопаливного теплогенератора невеликої теплопродуктивності з комплексною організацією топкового процесу із забезпеченням інтенсифікації очищення газів від твердих частинок з високою повнотою їх вигорання на вході конвективних теплообмінних поверхонь.

**Виклад основного матеріалу.** Можна відмітити, що при пропозиціях промислового ринку різноманітної продукції котельної техніки за дефіциту якісного палива в паливному балансі країни, ефективне використання різних видів твердого палива є важливим завданням. Розвиток технологій використання дешевого твердого палива, зокрема рядового низькосортного, як альтернатива дорогим технологіям виробництва теплової енергії, можна розглядати як один із шляхів зниження залежності від імпорتنих енергоносіїв. У роботі запропоновано технологічну схему спалювання різних видів твердого палива в компактній двокамерній топці теплогенератора невеликої потужності. Така технологічна схема є розвитком конструктивної схеми теплогенератора з камерами згоряння та золоосадження (рис. 7, [1]).

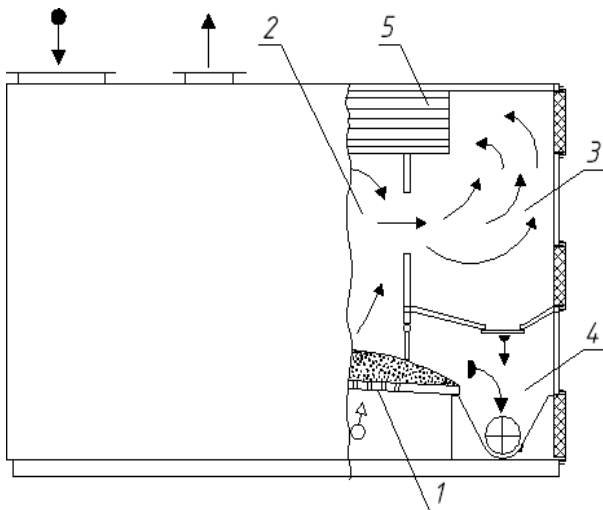


Рис. 7. Схема твердопаливного теплогенератора з золоосаджувальною камерою:

1 – колосникова решітка; 2 – первинна топкова камера;  
3 – вторинна топкова камера; 4 – зольник;  
5 – конвективний пакет

Умовні позначення на цьому рисунку і далі за текстом:  
● → – подача палива; ○ → – первинне повітря; ⊙ → – вторинне повітря; → ⊙ – продукти горіння; ⊙ → – виведення золи

За цією технологією спалювання передбачено поєднання шахтного і шарового процесів

спалювання палива та надшарового у первинній топковій камері 2 горіння продуктів газифікації паливної шахти у високотемпературному потоці продуктів згоряння палива на колосниковій решітці 1. З камери згоряння газу спрямовуються у вторинну топкову камеру 3, у якій відбувається часткова сепарація твердих частинок з подальшим відведенням їх до зольника 4 теплогенератора.

За відповідних режимних умов та подачі третинного дуттьового повітря на вході вторинної камери підтримується процес горіння у факелі вуглецевих частинок, винесених газами з первинної камери. Більша частка недогорілих і зольних частинок з потоком високотемпературних газів надходять до конвективного пакету 5 і під час експлуатації теплогенератора спричиняють забруднення теплообмінних поверхонь, знижуючи їх теплову ефективність [8, 15]. Крім того, неповнота згоряння вуглецевих частинок знижує ефективність роботи теплогенератора за рахунок втрат теплоти  $q_4^{втр}$ . Вплив названих факторів на зниження ефективності роботи теплогенератора посилюється за використання рядового низькосортного палива з великим вмістом дрібних фракцій.

Також пропонується вдосконалена технологія двокамерного спалювання (рис. 8) в конструкції твердопаливного теплогенератора невеликої потужності мінімізується негативний вплив названих вище факторів. Така технологія передбачає інтенсифікацію вигорання вуглецевих частинок, винесених газами з первинної топкової камери, та їхньої сепарації з потоку високотемпературних газів на вході конвективних теплообмінних поверхонь.

Конструкція теплогенератора передбачає:

- шахтно-шарову механічну топку з бункером і пристроями паливopодачі (на рисунку не показано);
- первинну топкову камеру над шаром палива, що горить на колосниковій решітці;
- вторинну циклонну камеру (або камери) з вихровим факелом;
- зольник з механічним пристроєм золовидалення;
- колектор третинного повітря на виході газів з первинної камери;
- конвективний пакет;
- газову камеру між циклонною камерою та входом до конвективного пакету;
- патрубок відвідних газів;
- теплоізолювані кришки (люки) для обслуговування газової камери, циклонної камери та зольника.

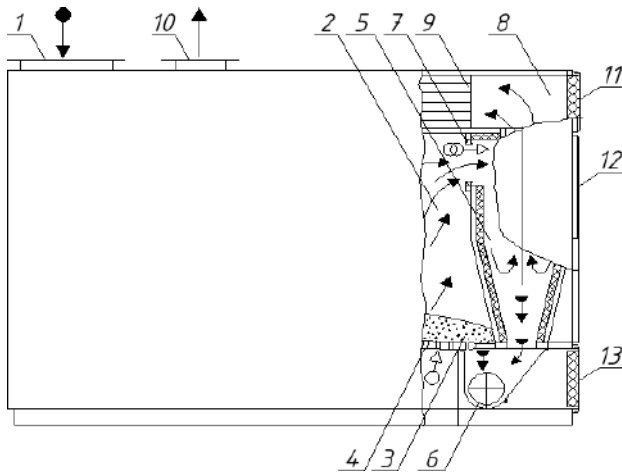


Рис. 8. Схема твердопаливного теплогенератора з циклонною камерою згоряння:  
 1 – бункер топки; 2 – первинна топкова камера; 3 – шар палива, що горить; 4 – колосникова решітка; 5 – вторинна циклонна камера; 6 – зольник; 7 – колектор третинного повітря; 8 – конвективний пакет; 9 – камера газова; 10 – патрубок відхідних газів; теплоізолювані кришки для обслуговування; 11 – камери газової; 12 – циклонної камери; 13 – зольника

Корпус циклонної камери передбачається водоохолоджуваній, внутрішня поверхня якого покрита футерівкою.

Підвищення економічності роботи за такою технологічною схемою підтверджується розрахунковим аналізом з урахуванням практичного досвіду. На рис. 9 наведено розрахункові залежності коефіцієнта корисної дії твердопаливного теплогенератора потужністю 0,63 МВт при спалюванні за номінального навантаження різних марок вугілля (нижча теплота згоряння:  $Q_{нr} = 17,25$  МДж/кг,  $Q_{нr} = 19,38$  МДж/кг,  $Q_{нr} = 23,03$  МДж/кг; зольність  $A^r = 32,20 \dots 14,80$  %) за різних технологічних схем.

За запропонованої схеми з циклонною камерою згоряння розрахункові середні величини приросту коефіцієнта корисної дії теплогенератора за номінального навантаження складають майже 8 % порівняно з однокамерною схемою спалювання та 4 % порівняно зі схемою з камерами згоряння і золоосадження.

Якщо знизити теплове навантаження теплогенератора, уточнені показники роботи можна отримати за експериментальних і налагоджувальних випробувань. Удосконалена двокамерна схема спалювання забезпечує європейські вимоги ефективності роботи теплогенератора на розсортованому малозольному кам'яному вугіллі – розрахунковий ККД не нижче 90 % [17].

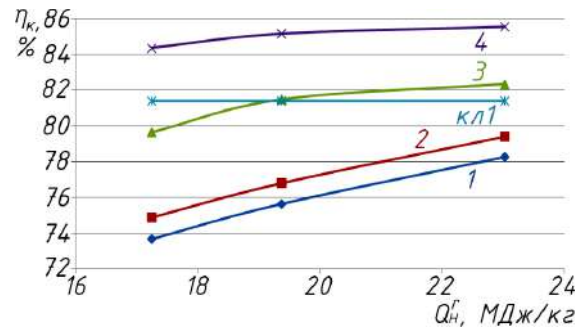


Рис. 9. Розрахункові криві зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) твердопаливного теплогенератора по використанню рядового вугілля різної якості за технологічних схем спалювання:

1, 2 – однокамерної відповідно за відсутності та наявності механічного очищення конвективних теплообмінних поверхонь; 3 – з камерами згоряння і золоосадження; 4 – з первинною і циклонною вторинною камерами згоряння; кл1 – нормативна величина ККД за першим класом вимог [16]

Така схема з допалюванням пилових частинок та очищення газів від золи на вході конвективного пакету дозволяє підвищити рівень форсування горіння шару в паливній шахті і на колосниковій решітці. Таким чином значно інтенсифікується процес горіння.

Зазвичай, швидкість дуттьового повітря на вході шару, що горить на колосниковій решітці, не перевищує 0,4 м/с. При підвищенні цієї швидкості до 0,6 м/с і збереженні стійкості шару питома швидкість горіння коксу вугілля зростає приблизно в 1,2 рази [18, 19]. Це дає можливість зменшити площу дзеркала горіння, а відповідно зменшити конструктивні габарити первинної камери згоряння.

Зменшення площі дзеркала горіння за заданої потужності теплогенератора покращує умови зниження коефіцієнта надлишку повітря. Відповідно зменшуються непродуктивні втрати теплоти, пов'язані з перевитратою дуттьового повітря.

**Висновки.** Запропонована конструктивна схема твердопаливного теплогенератора невеликої теплопродуктивності з комплексною організацією топкового процесу із забезпеченням інтенсифікації очищення газів від твердих частинок з високою повнотою їх вигорання на вході конвективних теплообмінних поверхонь є перспективною у підвищенні ефективності роботи котельного обладнання комунальної енергетики.

### Література

1. Сенчук М.П. Спалювання низькосортного твердого палива в теплогенераторах систем автономного і децентралізованого теплопостачання / М.П.Сенчук // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 25. – с. 25-30.
2. Корчевой Ю.П. Новітні технології використання вугілля в енергетиці / Ю.П. Корчевой, Г.Г. Півняк // *Наука та інновації.* – 2006. – Т. 2, № 2. – с. 53-62.
3. Варламов Г.Б. Вплив характеристик непроєктного твердого палива на показники надійності та економічності роботи котельного устаткування / Г.Б. Варламов, А.О. Капустянський // *Енергетика: економіка, технології, екологія.* – 2018. – № 1. – с. 90-98.
4. Передовой опыт в использовании энергии биомассы, в 2-х частях: Комитет по энергоэффективности Беларуси. – Минск, 2006. – 198 с. Режим доступа: [https://energoeffekt.gov.by/books\\_media\\_campaign/](https://energoeffekt.gov.by/books_media_campaign/)
5. Рогачов В.А. Анализ современных методов сжигания бурого угля в передтопках / В.А. Рогачов, С.А. Рева, М.В. Ванджура // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2013. – № 3/8. – с. 50-54.
6. Майстренко О.Ю. Технология та палик для спалювання біомаси як допоміжного палива в факельних котлоагрегатах / О.Ю. Майстренко, Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько, Д.Л. Бондзик, Т.С. Щудло, В.Г. Вифатнюк // *Наука та інновації.* – 2013. – Т.8, № 4. – с. 83-88.
7. Чернокрылюк В.В. Твердотопливные котлы с топками «кипящего слоя» / В.В. Чернокрылюк, А.Ф. Редько, А.М. Тарадай, В.А. Сиротенко, Е.С. Есин // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб.* – 2015. – Вип. 18. – с. 30-36.
8. Сенчук М.П. Зниження впливу забруднення поверхонь нагріву твердопаливних теплогенераторів невеликої потужності / М.П. Сенчук, А.М. Рибка, О.І. Юрко // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 33. – с. 15-21.
9. Вавилов В.И. Исследование эффективности сжигания низкосортного твердого топлива в паровых и водогрейных котлах малой и средней мощности с двухъярусной топкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04/ В.И. Вавилов; Московский государственный университет. – Москва, 2020. – 24 с.
10. Мадоян А.А. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах / А.А. Мадоян, В.Н. Балтян, А.Н. Гречаный. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
11. Нечаев Е.В. Механические топки для котлов малой и средней мощности / Е.В. Нечаев, А.Ф. Лубнин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 311 с.
12. Твердопаливні котли «Світлобор» (Україна). Режим доступа: <https://domkotlov.by/stati/pelletnye-kotly/unikalnyj-pelletnyj-kotyol-svetlorbor>.
13. Твердопаливні теплогенератори «Verkes» (Англія). Режим доступа: <https://youtu.be/7G5fRVsFLdg>.
14. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы / Е. А. Бойко. – Красноярск: Изд-во Красноярского государственного технического университета, 2006. – 292 с.
15. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – Санкт-Петербург: ВТИ, НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
16. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт:– Введен с 2003-01-01. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.–16 с.
17. ДСТУ EN 303-5:2014. Котли опалювальні. Частина 5. Опалювальні котли на твердому паливі з ручним і автоматичним завантаженням топки і номінального теплотворного здатністю до 500 кВт. Термінологія, вимоги, випробування та маркування (EN 303-5:2012? IDT). – Чинні від 01.01.2016. – ДП «УкрНДНЦ», 2014.
18. Основы практической теории горения / Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др.; под ред. В.В. Померанцева – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
19. Senchuk M. P. Simulation of Solid-Fuel Hybrid Combustion / М.П. Сенчук, А.В. Барковский // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб.* – 2017. – Вип. 21. – с. 11-17.

### References

1. Senchuk M.P. “Spaliuvannia nyzkosortnoho tverdoho palyva v teploheneratorakh system avtonomnoho i detsentralizovanoho teplopstachannia”. *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia*, 2018. Vyp. 25. s. 25-30.
2. Korchevoi Yu.P., Pivniak H.H. “Novitni tekhnologii vykorystannia vuhillia v enerhetytsi”. *Nauka ta innovatsii*. 2006. T. 2, № 2. s. 53-62.
3. Varlamov H.B., Kapustianskyi A.O. “Vpliv kharakterystyk neproektnoho tverdoho palyva na pokaznyky nadiinosti ta ekonomichnosti roboty kotelnoho ustatkuvannia”. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnologii, ekolohiia*. 2018. № 1. s. 90-98.
4. *Peredovoi opyt v ispolzovanii energii biomassy, v 2-kh chastiakh*: Komitet po energoeffektivnosti Belarus. Minsk, 2006. URL: [https://energoeffekt.gov.by/books\\_media\\_campaign/](https://energoeffekt.gov.by/books_media_campaign/)
5. Rohachov V.A., Reva S.A., Vandzhura M.V. “Analiz suchasnykh metodiv spaliuvannia buroho vuhillia v peredtopkakh”. *Vostochno-Europeiskyi zhurnal peredovykh tekhnologii*. 2013. № 3/8. s. 50-54.
6. Maistrenko O.Yu., Dunaievska N.I., Zasiadko Ya.I., Bondzyk D.L., Shchudlo T.S., Vyfatniuk V.H. “Tekhnolohiia ta palnyk dla spalyuvannia biomasy iak dopomizhnoho palyva v fakelnykh kotloahrehatakh”. *Nauka ta*

innovatsii. 2013. Т. 8, № 4. s. 83-88.

7. Chernokryliuk V.V., Redko A.F., Taradai A.M., Syrotenko V.A., Esyn E.S. “Tverdotoplivnye kotly s topkami «kipiashchego sloia»”. *Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohazopostachannia*. 2015. Vyp. 18. s. 30-36.

8. Senchuk M.P., Rybka A.M., Yurko O.I. “Znyzhennia vplybu zabrudnennia poverkhon nahrivu tverdopalyvnykh teploheratoriv nevelykoj potuzhsti”. *Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohazopostachannia*. 2020. Vyp. 33, s. 15-21.

9. Vavilov V.I. I Moskovskiyi hosudarstvennyi universytet *ssledovanie efektyvnosti szhiganiia nyzkosortnogo tverdogo topliva v parovykh vodogreinykh kotlakh maloi i srednei moshchnosti s dvukhiarusnoi topkoi*. Diss. abstract. Moskovskiyi hosudarstvennyi universytet, 2020.

10. Madoian A.A., Baltian V.N., Grechanyi A.N. *Effectivnoe szhiganie nizkosortnykh uglei v energeticheskikh kotlakh*. Energoatomizdat, 1991.

11. Nechaiev E.V., Lubnin A.F. *Mekhanicheskie topki dlia kotlov maloi i srednei moshchnosti*. Energiia, 1968.

12. Tverdopalyvni kotly «Svitlobor» (Ukraina). URL: <https://domkotlov.by/stati/pelletnye-kotly/unikalnyj-pelletnyj-kotyol-svetlobor/>

13. Tverdopalyvni teploheratory «Berkes» (Anhliia). URL: <https://youtu.be/7G5fRVsFLdg>.

14. Boiko E.A. *Kotelnye ustanovki i parogeneratory*. Yzd-vo Krasnoiarsskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta, 2006.

15. *Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod)*. Sankt-Peterburh: VTY, NPO TsKTY, 1998.

16. *Kotly otopitelnye vodogreinye teploproizvoditelnosti ot 0,1 do 4 MVt: GOCT 30735-2001*. Mezghosudarstvennyi sovet po standartyzatsii, metrologii i sertyfikatsii, 2001.

17. DSTU EN 303-5:2014. *Kotly opaliuvalni. Chastyna 5. Opaliuvalni kotly na tverdomu palyvi z ruchym i avtomatychnym zavantazhenniam topky i nominalnoiu teplotvernoiu zdatsnistiu do 500 kVt. Terminolohiia, vymohy, vuprobuvannia ta markuvannia (EN 303-5:2012? IDT)*. DP «UkrNDNZ», 2014.

18. Pomeranzev V.V., Arefiev K.M., Akhmedov D.B. i dr. *Osnovy prakticheskoi teorii gorenii*. Enerhoatomizdat, 1986.

19. M.P.Senchuk, A.V.Barkovskiy. “Simulation of Solid-Fuel Hybrid Combustion”. *Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohazopostachannia*, 2017. Vyp. 21. s. 11-17.

## УДК 697.432

### Повышение эффективности сжигания твердого топлива в слое

М. П. Сенчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц., Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

**Аннотация.** Проанализированы основные направления повышения эффективности работы твердотопливных теплогенераторов. Отмечено, что в промышленных образцах теплогенерирующих установок в зависимости от их класса применяются различного уровня по капитальным и эксплуатационным затратам технологические схемы сжигания твердого топлива. Приведены примеры реализации таких технологических схем сжигания, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, в конструкциях твердотопливных теплогенераторов. В работе предложена конструктивную схему теплогенератора небольшой мощности с комбинированной технологией двухкамерного сжигания твердого топлива, в которой объединены слоевой (или шахтного-слоевой) процесс горения со сжиганием в объеме: в первичной камере сгорания над слоем горящего топлива на колосниковой решетке, и во вторичной циклонной камере (или камерах). Благодаря вихревому движению в футерованной вторичной камере высокотемпературных газов с содержанием твердых частиц, вынесенных потоком из зоны горения первичной камеры, происходит как дожигания горючих веществ, так и сепарация зольных частиц с отводом их в зольник теплогенератора. Такая технология сжигания позволяет также повысить форсирование горения слоя на колосниковой решетке, повысить стабильность процесса, уменьшить габариты конструкции. Повышение эффективности работы твердотопливного теплогенератора с двухкамерной топкой достигается благодаря уменьшению потерь тепла с механической неполнотой сгорания углеродных частиц в отходящих газах, а также снижению концентрации зольных частиц в потоке газов на входе конвективных теплообменных поверхностей и соответственно повышение их тепловой эффективности. Это подтверждено расчетными зависимостями эффективности работы механизированного твердотопливного теплогенератора при различных технологических схемах сжигания твердого топлива

**Ключевые слова:** твердопаливний теплогенератор, технологическая схема сжигания, первичная и вторичная камеры сгорания, циклонная камера сгорания, двухкамерная топка, твердое топливо

UDK 697.432

## Increasing the efficiency of burning solid fuel in the layer

M. Senchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

**Abstract.** *The main directions of increasing the efficiency of solid fuel heat generators are analyzed. It is noted that in industrial designs of heat generating installations depending on their class technological schemes of burning of solid fuel are applied at various levels on capital and operational expenses. The most expensive are the technologies of combustion of pre-prepared high-quality fuel in heat generators with complex mechanization at all stages of the combustion process, which provide high thermal and environmental performance. Cheaper combustion technologies are widespread, according to which the normative performance of heat generators is achieved due to the rational ratio of design and mode parameters of the combustion zone with the thermophysical characteristics of the burned fuel, including low-grade. Examples of realization of such technological schemes of combustion on the basis of results of theoretical and experimental researches in designs of solid propellant heat generators are resulted. The paper proposes a constructive scheme of a small-capacity heat generator with a combined technology of two-chamber solid fuel combustion, in which a layered (or shaft-layered) combustion process with combustion in volume is combined: in the primary combustion chamber above the burning fuel layer on the grate, and in the secondary cyclone chamber (or cameras). Due to the vortex motion in the lined secondary chamber of high-temperature gases containing solid particles carried by the flow from the combustion zone of the primary chamber, there is both afterburning of combustible substances and separation of ash particles with their discharge into the ash generator. This combustion technology also allows increasing the forcing of the combustion layer on the grate, increasing the stability of the process and reducing the dimensions of the structure. Improving the efficiency of a solid fuel heat generator with a two-chamber furnace is achieved by reducing heat loss with mechanical incomplete combustion of carbon particles in the exhaust gases, as well as reducing the concentration of ash particles in the gas stream at the inlet of convective heat exchange surfaces and increase their thermal efficiency. This is confirmed by the calculated dependences of the efficiency of the mechanized solid fuel heat generator under different technological schemes of solid fuel combustion*

**Keywords:** *solid fuel heat generator; technological scheme of combustion, primary and secondary combustion chambers, cyclone combustion chamber, two-chamber furnace, solid fuel*

Надійшла до редакції / Received 23.08.2021

УДК 697.331

## Нові підходи до організації централізованого теплопостачання

П. М. Гламаздін<sup>1</sup>, К.О. Баранчук<sup>2</sup>, О. В. Приймак<sup>3</sup>

<sup>1</sup>доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, sib.kiev@gmail.com, ORCID 0000-0003-2611-2687

<sup>2</sup>Заступник Директора з науково-технічних питань, Danfoss Україна, м.Київ, Україна, kyrylo.baranchuk@danfoss.com

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 02opriymak@gmail.com

*Анотація. Системи централізованого теплопостачання міст України знаходяться в глибокій кризі і потребують рішучих заходів для виходу з неї. Криза почалася ще в дев'яностих роках минулого сторіччя і поступово поглиблюється. Декілька спроб зупинити цей процес і вирівняти стан систем, що були задекларовані на державному рівні, не мали успіху. У той же час у країнах Північної Європи почався процес інтенсивного розвитку подібних систем, причому як на теоретичному рівні, так і в практичній реалізації теоретичних напрацювань. Згідно з теоретичним аналізом життєвого циклу систем централізованого теплопостачання вони знаходяться зараз на четвертому етапі свого розвитку в країнах Північної Європи. Цей етап має головні особливості – це зниження температури в мережі (температурний графік), поєднання систем централізованого теплопостачання з системами централізованого холодопостачання та їхня глибока інтеграція в загальну енергосистему міст, а також поступова заміна органічних палив на відновлювані джерела енергії. Системи централізованого теплопостачання в містах України знаходяться всього на другому етапі розвитку. Для збереження конкурентоздатності проти децентралізованих систем потрібен різкий перехід до третього та хоч би частково четвертого етапу розвитку подібних систем. На жаль, а ні в керівних органах, а ні в широкому загалі спеціалістів цього розуміння немає. Позачергове завдання – підвищення кваліфікації керівників та експлуатаційного стану міських систем централізованого теплопостачання та відповідальних осіб міських адміністрацій.*

*Ключові слова: системи централізованого теплопостачання, низькотемпературні системи, безвуглецева енергетика, відновлювані джерела енергії, енергетичні системи.*

**Вступ.** Світ швидко змінюється. Частина цих змін носить кардинальний характер. Змінюється й уявлення щодо місця систем централізованого теплопостачання при плануванні розвитку міст. Сьогодні системи централізованого теплопостачання розглядаються як невід'ємна частина загальної енергосистеми міста та його господарства. У самій системі різко зростає роль відновлюваних джерел енергії, серед яких тих, які виробляють теплоту. Більше того, основною тенденцією розвитку енергосистем стає поступова відмова від вуглеводних палив з тим, щоб зменшити надходження двоокису вуглецю до атмосфери. У Європейському Союзі прийнято так званий Новий Зелений курс (Green New Deal), який декларує бажання європейської спільноти стати першим вуглецево-нейтральним континентом до 2050 року [1]. Однією з великих проблем на шляху до поставленої мети є декарбонізація систем теплопостачання й охолодження, на які припадає приблизно 50 % кінцевої витрати енергії в Європейському Союзі і які сильно залежать від викопного палива [2]. Для вирішення цієї проблеми в країнах Північної Європи з'явилися нові підходи до розроблення систем централізованого тепло- і холодопостачання.

**Актуальність проблеми.** Якщо в країнах Північної Європи централізоване теплопостачання знаходиться в стадії інтенсивного роз-

витку, то в Україні системи централізованого теплопостачання знаходяться в занепаді [3] і досить швидко втрачають свої позиції на користь помірно децентралізованих та індивідуальних систем. Тому є багато причин і були спроби на державному рівні вирішити проблему оптимізації систем централізованого теплопостачання [4,5], але вони не призвели до якихось значущих результатів [6]. Проблема дедалі загострюється і так чи інакше її прийдеться вирішувати. Досвід країн Північної Європи може бути вельми корисним і для України. Тим більше, що Україна є країною з дефіцитом енергоносіїв. Таким чином, вивчення досвіду цих країн і адаптація його для умов України є актуальним питанням.

**Основна частина.** Системи централізованого теплопостачання мають довгу історію. Фактично перші спроби впровадження систем централізованого теплопостачання можна знайти ще в XIV сторіччі у Франції в селі Chaudes-Aigues [7], де використовувалася теплота геотермальних джерел. Там було побудовано примітивну теплову мережу. Подібні системи розвивались і в Італії, де вони використовуються й зараз [8].

На сьогодні фахівці з університету Aalborg в Данії [9] пропонують виділяти при розгляді систем централізованого теплопостачання чотири етапи (табл.).



Особливості систем централізованого теплопостачання і холодопостачання

Поконління, вид системи	Джерела	Температурний графік, °С		Теплова мережа	Тип теплообмінників	Регулювання температури на виході з джерела	Регулювання (тепловий пункт)	
		первинного контуру	системи опалення або охолодження				групове (центральний (ЦТП))	місцеве (індивідуальний (ІТП))
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перше, Т	ТЕЦ і водогрійні котельні, що працюють на викопному паливі	до 300	105	Погано ізольовані труби в бетонних каналах. Поступово труби повернення конденсату від'єднувалися. Втрати понад 30 %	Використання пари в промислових процесах та перетворення в спеціалізованих теплообмінниках	Якісне	Якісне/Відсутнє	Відсутнє
Друге, Т	ТЕЦ і водогрійні котельні на викопному паливі	150-70 130-70 115-70 105-70 95-70	95-70	Погано ізольовані труби в бетонних каналах. Втрати понад 15-20%	Кожухотрубний	Якісне	Якісне/якісно-кількісне/відсутнє	Якісне/відсутнє
Третє, Т	ТЕЦ і водогрійні котельні на викопному паливі, біомасі та відходах, теплові акумулятори, низькопотенційна теплота промисловості, великомасштабні сонячні і теплонасосні станції	95-70 80-60 70-40	Відповідно до температури в первинному контурі	Попередньо ізольовані труби в землі Втрати 7-10%	Пластинчасті, переважно розбірні	Якісне/якісно-кількісне	Якісно-кількісне	Якісно-кількісне
Четверте, Т	ТЕЦ у вигляді сміттеспалювальних заводів, що використовують біомасу, низькопотенційна теплота, геотермальна енергія, великомасштабні сонячні й теплонасосні станції, сезонне зберігання теплоти, теплова акумуляція, обмін енергією між будівлями, поновлювані джерела генерації електроенергії.	65-45 50-35 40-25	Відповідно до температури в первинному контурі	Попередньо-ізольовані труби в землі. Втрати $\geq$ 1-3%	Пластинчасті, переважно паяні	Якісно-кількісне. Змінна температура в залежності від навантаження.	Якісно-кількісне	Якісно-кількісне. Індивідуальне управління приміщенням з виявленням присутності або контролем попиту

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Четверте, X	Холодильні машини з гвинтовими й центробіжними компресорами, абсорбційні холодильні машини, комбінація абсорбційних і електричних холодильних машин, природне охолодження, геотермальна енергія, акумуляція	6-7-13-15 6-15-8-25	Температура в приміщенні 23-26 у період охолодження для другої категорії згідно з EN 16798-1:2019	Попередньо-ізольовані труби в землі. Втрати $\geq 6\%$	Пластинчасті, переважно паяні	Якісно-кількісне. Змінна температура залежно від навантаження.	Якісно-кількісне	Якісно-кількісне

Примітка: Т – теплопостачання, X – холодопостачання

Першим етапом розвитку цих систем вони вважають парові системи в США [10,11,12,13]. Для цих систем характерні (табл.) великі теплові втрати, низька ефективність, високі експлуатаційні витрати [13].

Другим етапом розвитку (табл.) прийнято в цій класифікації вважати системи, що їх було розроблено й поширено в СРСР і в країнах східної Європи, які поєдналися в «Раду економічної взаємодопомоги» [14]. Їхня теорія активно розвивалась у середині минулого сторіччя [15]. У цих системах як теплоносіїв використовувалася перегріта вода з різними температурними графіками (150-70, 130-70, 115-70, 105-70 °С), а для групових котельень (помірно децентралізованих систем) – 95-70 °С [16].

Джерелами теплоти передбачалися ТЕЦ для великих міст або опалювальні водогрійні котельні. Теплова мережа виконувалася з електрозварних труб з нелегованої сталі. Утеплювалися труби мінераловатними матами з подальшою гідроізоляцією руберойдом.

Труби прокладалися під землею здебільшого в залізобетонних непрохідних каналах. Абонентські вводи для зниження температури та регулювання оснащувалися гідроелеваторними вузлами за залежною схемою під'єднання до теплових мереж.

Для зменшення кількості регулювальних приладів і теплообмінників гарячого водопостачання використовувалися центральні теплові пункти. Це були групові теплові пункти, у яких розташовувалися теплообмінники гарячого водопостачання, певна регулювальна арматура, підвищувальні насоси систем опалення і рециркуляційні насоси систем гарячого

водопостачання. На вході вони під'єднувалися до двотрубною системи, а на виході від них до окремих будинків прокладалися чотиритрубні системи.

Крім усіх відомих недоліків цих систем необхідно відмітити й те, що в них від початку використовувалися кожухотрубні теплообмінники. Для їхньої роботи необхідно використовувати великий об'єм теплоносія. Це примушувало збільшувати об'єми води в мережі, а отже перевитрачати енергію на її підготовлення, на менш ефективну роботу систем регулювання через підвищену інерційність тощо. І врешті-решт збільшувалася витрата первинного палива на генерування цієї електроенергії.

В Україні експлуатуються досі системи теплопостачання саме другого покоління. Зусилля інженерів направлені на модернізацію саме такого обладнання.

У Європі, і зокрема в Північній Європі до сімдесятих років минулого сторіччя системам централізованого теплопостачання не приділялося належної уваги. Інтерес до систем централізованого теплопостачання з'явився після нафтової кризи 1973 року.

Оскільки найбільшу активність у розробленні концепції удосконалення й підвищення ефективності систем централізованого теплопостачання виявилася в країнах Скандинавії, то розроблені на третьому етапі (табл.) розвитку централізованих систем технології назвали «скандинавськими» [17]. Розробники уважно вивчили й проаналізували досвід експлуатації систем централізованого теплопостачання в СРСР та інших країнах Європи і доклали максимум зусиль для подолання основних недоліків.

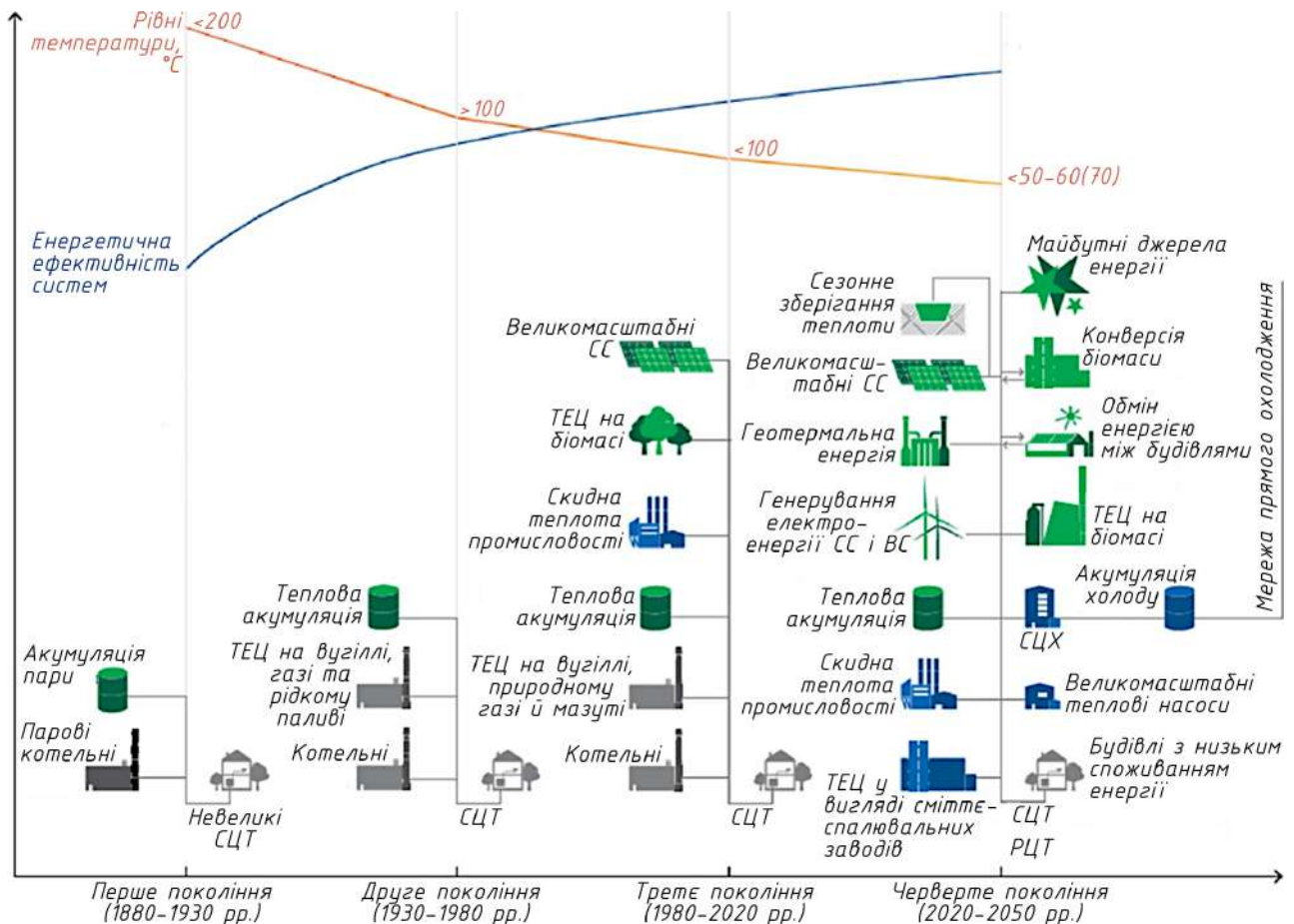


Рис 1. Еволюція систем ЦТ в чотирьох поколіннях з концептуальним графіком енергетичної ефективності та рівня температури залежно від часу, роки:

СЦТ — системи централізованого тепlopостачання; СЦХ — те ж холодopостачання;  
 СС — сонячні станції; ВС — вітрові станції;

РЦТ — розроблення (генерація) центрального тепlopостачання / період найкращих доступних технологій

Основні досягнення в технічному плані:

- повністю автоматизовані теплові пункти з погодним регулюванням як індивідуального призначення, так і розподільчі для приєднання окремого району до магістральних трубопроводів, у яких замість кожухотрубних теплообмінників використовуються пластинчаті паяні або розбірні;
  - початок використання систем диспетчеризації та збору даних (SCADA) для контролю за роботою індивідуальних теплових пунктів;
  - використання попередньо ізольованих трубопроводи з прокладанням їх без каналів та з контролем їхньої цілісності з центрального пульта системи керування;
  - використання теплоелектроценталей як основних джерел теплоти з поступовим переводом котельень у піковий режим;
  - перехід теплоелектроценталей на парогазовий термодинамічний цикл;
  - збільшення використання біомаси як палива для водогрійних котлів.
- Як важливий захід необхідно відмітити

перехід на низькотемпературні режими роботи мережі з температурою теплоносія менше 100 °С. Це сприяло підвищенню надійності експлуатації теплової мережі та зменшенню тепловтрат у ній. Головний ефект з'явився у можливості використовувати в системі скидну теплоту від промисловості та використання в системах відновлювальних джерел, які здебільшого дають змогу отримувати саме низькотемпературну теплоту.

Здобутки розроблених технологій третього покоління активно використовують для модернізації систем централізованого тепlopостачання країн Східної Європи та Прибалтики. Останнім досягненням технологій третього покоління можна вважати розроблення інтелектуальних алгоритмів управління тепловими пунктами, які на основі комплексу безпроводних датчиків температури збирають інформацію з усіх приміщень будівлі, аналізують отриману статистику та на основі цього аналізу розробляють оптимальні режими теплоспоживання будівлею [18].

Необхідно відмітити, що в СРСР відбувався подальший розвиток стандартних систем

другого покоління. Багато заходів, реалізованих у «скандинавській» моделі, були теоретично обґрунтовані саме в СРСР [19], де так і не були технічно реалізовані.

Наполегливе прагнення європейської спільноти досягти рівня безвуглецевої енергетики призвели до поступового переходу з третього на четвертий етап розвитку систем централізованого теплопостачання (табл.).

Системи стають комплексними системами тепло- та холодопостачання. Переважні джерела енергії – це відновлювані джерела. Але оскільки вони мають переривчастий характер роботи, передбачається розвиток теплоаккумуляційних систем, серед яких сезонних. Велику роль відіграють теплові насоси. При цьому їхня одинична потужність суттєво зростає.

Як пікові джерела використовуються когенераційні установки. Передбачається використання зайвої електроенергії для генерування і запасання теплоти. Активно розширюється використання скидної теплоти не лише від промисловості, а й від торгівельно-розважальних центрів, центрів оброблення даних, електростанцій тощо. Як паливо для резервних і пікових джерел енергії планується використання водню та синтетичних газів.

Велику гнучкість загальної енергосистеми надають підсистеми централізованого холодопостачання [20]. Таким чином можна узагальнити уявлення про четвертий етап розвитку систем централізованого теплопостачання основною тезою – вона стала невід’ємною частиною загальної енергосистеми міста, як це ілюструє рис. 1. До того ж вона стає невід’ємною частиною міського господарства взагалі, бо передбачає отримання енергії від перероблення міського сміття на сміттєспалювальних заводах, відбору теплоти від стічних вод, метро тощо.

Зазначений підхід закріплено в Стратегії інтеграції енергетичної системи Європейського Союзу [21]. Прикладом розроблення проєкту модернізації системи централізованого теплопостачання міста з використанням положень концепції четвертого етапу розвитку може слугувати концепція модернізації теплопостачання міста Гельсінкі.

Вимоги до проєкту модернізації викладені в умовах до глобального конкурсу з декарбонізації системи опалення міста Гельсінкі – «Helsinki Energy Challenge», якій закінчився навесні 2021 року [22]. Згідно з цими вимогами в найближчі роки повинні закінчити свій життєвий цикл дві вугільні ТЕЦ. Натомість зростають потужності теплонасосних станцій, які використовують теплоту з моря та зі стоків

очисної станції міста.

Наразі проєктується теплонасосна станція, розташована на території ТЕЦ Vuosaari, яка буде використовувати 20 % теплоти морської води та 80 % надлишкової теплоти охолоджувальної води від внутрішньої циркуляції електростанції. Таким чином не тільки зросте потужність системи централізованого теплопостачання на 13 МВт, а й система централізованого холодопостачання отримує ще одне ефективне джерело потужністю 9,5 МВт [23].

Пропонується застосування акумуляторів теплоти великих об’ємів. Наприклад, акумулятор Mustikkamaa має об’єм 320000 м<sup>3</sup>. Це – природна печера. Акумулятор теплоти на ТЕЦ Vuosaari має об’єм 25000 м<sup>3</sup>. Це вертикальний циліндр заввишки 42 м діаметром 29 м. Концепція передбачає глибоку термомодернізацію будівель і споруд з об’єднанням управління всієї системи в єдиному центрі, що має зменшити загальне теплове навантаження.

На жаль в Україні процеси термомодернізації будівель і модернізації систем централізованого теплопостачання просуваються дуже повільно. Там, де ці процеси просуваються, це робиться безсистемно і без урахування досвіду хоча б «скандинавської» технології.

Є поодинокі приклади реалізації деяких положень цієї технології. Наприклад у Запоріжжі є досвід використання скидної теплоти від комбінату «Запоріжсталь». Але в інших містах з розвинутою промисловістю цей досвід не використовується. У Вінниці функціонує автоматизована система централізованого теплопостачання мікрорайону із 45 будинками і своєю квартальною котельнею, якою керує центральний диспетчерський пункт. Навіть в самій Вінниці цей досвід не просувається. Можна навести ще окремі приклади, що їх здійснено лише через дуже активну позицію місцевих керівників.

Спроби розробити для кожного міста проєкт модернізації теплопостачання [24] мали на меті за будь-яку ціну зменшити споживання газу на 30 %. Вони проводилися без урахування наявного досвіду впровадження «скандинавської» моделі в країнах Східної Європи та Прибалтики [25]. У результаті жоден з розроблених проєктів не був втілений у життя. Сьогодні історія повторюється.

Розроблена «Схема теплопостачання міста Києва до 2030 року» [26] не містить не лише напрацьовань концепції четвертого покоління розвитку систем централізованого теплопостачання, але навіть «скандинавської» моделі:

- дві парові ТЕЦ не передбачається переводити в парогазовий цикл;

- не передбачено розвиток теплонасосних станцій;
- акумуляція теплоти передбачена лише на ТЕЦ № 6, що є досить потужною ТЕС, як для пілотного проєкту акумуляції в Україні;
- не проаналізовано потенціал централізованого холодопостачання і не визначено створення зон де такі системи можна впроваджувати.

Не враховано ці та багато інших напрацювань європейських колег. Фактично все зводиться до капітального ремонту теплових мереж та модернізації наявних водогрійних котлів у районних котельнях та станціях теплопостачання з метою зменшення викидів NO<sub>x</sub> та CO до європейської норми [27]. Таке положення склалося через відсутність чіткого бачення методів вирішення проблем, що накопичились у системах централізованого теплопостачання міст, та відсутність бачення необхідності планування подальшої модернізації, розбудови та зміни концепції енергетичної системи України.

Відносна необізнаність як керівництва, так і інженерно-експлуатаційного складу теплопостачальних організацій щодо новітніх енергоефективних рішень призводить до бажання триматися відомих та добре засвоєних консервативних традиційних технологій. Існування монопольної вертикалі “генерування теплоти – її транспортування та постачання” дозволяє списувати втрати в теплових мережах та на джерелах теплоти на споживача через непрозорі методи формування складових загального тарифу [28]. Наявна законодавча база не стимулює теплопостачальні організації до пошуків шляхів не лише розвитку, а й збереження наявних систем централізованого теплопостачання, які останнім часом дуже швидко втрачають свої позиції на користь помірно де-

централізованих та індивідуальних систем.

Однією з причин такого стану є відсутність державного органу, який би керував процесом модернізації систем централізованого теплопостачання. У 2014 році було припинено діяльність управління теплоенергетики в складі Міністерства регіонального розвитку та будівництва [29]. Замість управління теплоенергетики був виділений відділ комунальної теплоенергетики в складі чотирьох штатних співробітників, які просто фізично не спроможні проводити серйозну аналітичну та організаційну роботу.

Як наслідок, сьогодні відсутній орган, який би міг проводити масштабну роботу щодо розповсюдження досвіду енергоефективної модернізації систем централізованого теплопостачання та організувати підвищення кваліфікації спеціалістів, зайнятих у цій галузі. Тому навіть такий корисний для спеціалістів галузі документ, як рекомендації [30], залишивши поза увагою широкого загалу спеціалістів з теплопостачання.

**Висновки.** Наразі системи централізованого теплопостачання знаходяться в активній фазі свого розширення в країнах Західної Європи. Вони мають великі перспективи подальшого розвитку, зокрема в Україні. Системи централізованого теплопостачання разом з системами холодопостачання в процесі розвитку інтегруються в системи енергопостачання міст і взагалі в міське господарство. Відновлювані джерела теплоти дедалі більше витіснятимуть устаткування для спалювання викопаного палива з перспективою повної відмови від останнього. Для збереження залишків систем централізованого теплопостачання міст України необхідно вивчити й використовувати досвід країн Північної Європи та організувати цю роботу на державному рівні.

## Література

1. 2050 Long-Term Strategy Climate Action. URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (accessed on 19 March 2020).
2. S. Paardekooper et al., “Quantifying the Impact of Low-carbon Heating and Cooling Roadmaps,” Heat Roadmap Europe, Deliverable 6.4, 2018.
3. Степаненко В. Безопасность в централизованном теплоснабжении в городах Украины. URL: [https://energy-security.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralizovannom-teplosnabzhenyy-v-gorodah-ukrainy/p://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralizovannom-teplosnabzhenyy-vgorodahukrain%D1%8B%](https://energy-security.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralizovannom-teplosnabzhenyy-v-gorodah-ukrainy/p://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralizovannom-teplosnabzhenyy-vgorodahukrain%D1%8B%20).
4. Степаненко В. Кризис схем теплоснабжения или взлет энергетического планирования на Украине / В. Степаненко // Энергосовет. – 2012. – №4(23). – С.82-86.
5. Запатрина И.В. Жилищно-коммунальное хозяйство – перспективы развития / И.В. Запатрина, Т.Б. Лебеда // Экономика Украины. – 2012. – №10. – С.34-44.
6. Никитин Е.Е. Концептуальные положения модернизации существующих систем централизованного теплоснабжения / Е.Е. Никитин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2017. – №2. – С.11-21.
7. «Chaudes-Aigues: France’s first heating network» Source: <https://www.dhcnews.net/chaudes-aigues-frances-first-heating-network/>

8. «Industrial geothermal energy utilisation celebrates 200 years at Larderello, Italy» Source: Enel Green Power <https://www.thinkgeoenergy.com/industrial-geothermal-energy-utilisation-celebrates-200-years-at-larderello-italy/>
9. Thorsen Jan Eric. Progression of District Heating – 1st to 4th generation / Thorsen Jan Eric, Lund Henrik, Mathiesen Brian Vad // Environmental Science. – 2018.
10. Behnaz Rezaie. District heating and cooling: review of technology and potential enhancements / Behnaz Rezaie, Marc A. Rosen // Applied Energy. – 2012. – vol. 93. – iss. C. – P. 2-10.
11. Emily Pontecorvo. How to address New York City building emissions? One option: Start with steam. URL: <https://why.org/segments/how-to-address-new-york-city-building-emissions-one-option-start-with-steam/>
12. R. Gordon Bloomquist. Geothermal district heating system analysis, design, and development. URL: [https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2001Romania/bloomquist\\_dh.pdf](https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2001Romania/bloomquist_dh.pdf)
13. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 1<sup>st</sup>Generation. 2016. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-1st-generation-oddgeir-gudmundsson/>
14. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 2<sup>nd</sup>Generation. 2016. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-2nd-generation-oddgeir-gudmundsson/>
15. Соколов Е.Я. Тепловые сети / Е.Я. Соколов. – Москва: Госэнергоиздат, 1956. – С. 235.
16. Либерман Н.Б. Справочник по проектированию котельных установок централизованного теплоснабжения / Н.Б. Либерман, М.Т. Няковская. – Москва: Энергия, 1979. – 224 с.
17. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 3rd Generation. 2016. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-3rd-generation-oddgeir-gudmundsson/>
18. CASE STUDY | Wireless Temperature Monitoring for Energy Efficiency Optimization. 2020. URL: <https://aranet.com/case-study-wireless-temperature-monitoring-for-energy-efficiency-optimization/>
19. Богуславский Л. Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха / Л. Д. Богуславский и др. – Москва: Стройиздат, 1990. – 624 с.
20. Calderoni M, Babu Sree Kumar B, Dourlens-Quaranta S, Lennard Z, Rämä M, Klobut K, Wang Z, Duan X, Zhang Y, Nilsson J, and Hargo L. Sustainable District Cooling Guidelines. IEA DHC/CHP Report, 2019. URL: [https://www.ieadhc.org/fileadmin/documents/Annex\\_XII/2020\\_IEA\\_DHC\\_Sustainable\\_District\\_Cooling\\_Guidelines\\_new\\_design.pdf](https://www.ieadhc.org/fileadmin/documents/Annex_XII/2020_IEA_DHC_Sustainable_District_Cooling_Guidelines_new_design.pdf)
21. Factsheet: EU Energy System Integration Strategy (July 2020) [Електронний ресурс]. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs\\_20\\_1295](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1295)
22. Heating in Helsinki today. URL: <https://energychallenge.hel.fi/heating-helsinki-today>
23. New, unique heat pump utilising sea water heat to be built in Vuosaari. URL: <https://www.helen.fi/en/news/2019/heat-pump-sea-water-heat-vuosaari>
24. Методичні рекомендації з розроблення енерго- та еконоефективних схем теплопостачання населених пунктів України, затверджені Наказом Мінбуду України від 26.04.2006р. №147.
25. Приймак О.В. Аналіз технічних рішень, що пропонуються при розробці оптимізованих схем теплопостачання міст України / О.В. Приймак, П.М. Гламаздин // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2011. – № 1. – С.112-114.
26. Матеріали проекту Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року. URL: <https://dzki.kyivcity.gov.ua/content/zvit-seo-proektu-shemy-teplopostachannya-m-kyieva-do-2030-roku.html>
27. Національний план скорочення викидів від великих опалювальних установок. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 року № 796-р.
28. Теплова енергія та гаряче водопостачання. URL : <https://www.nerc.gov.ua/>
29. Наказ від 30.06.2016 № 188. Про внесення змін до Інструкції про порядок проведення технічної інвентаризації об'єктів нерухомого майна. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.
30. Интеграция низкотемпературных возобновляемых источников энергии в системы районного энергоснабжения: Рекомендации для лиц, ответственных за формирование политики: краткий обзор. – IRENA, Aalborg University, при поддержке Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. – Абу Даби: IRENA, 2021. – URL: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/Mar/IRENA\\_District\\_Energy\\_Systems\\_Summary\\_2021\\_RU.pdf?la=en&hash=D756F909D10C9ED-BCD700885560390528504EE12](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/Mar/IRENA_District_Energy_Systems_Summary_2021_RU.pdf?la=en&hash=D756F909D10C9ED-BCD700885560390528504EE12)

#### References

1. 2050 Long-Term Strategy Climate Action. URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (accessed on 19 March 2020).
2. S. Paardekooper et al., “Quantifying the Impact of Low-carbon Heating and Cooling Roadmaps,” Heat Roadmap Europe, Deliverable 6.4, 2018.
3. Stepanenko V. Bezopasnost v tsentralizovannom teplosnabzhenii v gorodakh Ukrainy. URL: [https://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralyzovannom-teplosnabzhenii v gorodakh Ukrainy. URL: https://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralyzovannom-teplosnabzhenyy-v-gorodah-ukrainy/p://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralyzovannom-teplosnabzhenyy-vgorodahukrayn%D1%8B%](https://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralyzovannom-teplosnabzhenyy-v-gorodah-ukrainy/p://energysecurity.org.ua/2020/02/bezopasnost-v-czentralyzovannom-teplosnabzhenyy-vgorodahukrayn%D1%8B%)
4. Stepanenko V. “Krizis skhem teplosnabzheniia ili vzlet energetycheskogo planirovaniia na Ukraine”. *Energosovet*. 2012. №4(23). S. 82-86.

5. Zapatrina I.V., Lebeda T.B. “Zhilishchno-komunalnoe khaziaistvo – perspektivy razvitiia”. *Ekonomika Ukrainy*. 2012. №10. P. 34-44.
6. Nikitin E.E. “Kontseptualnye polozheniia modernizatsii sushchestvuiushchikh sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniia”. *Energotekhnologii i resursosberezhenie*. 2017. №2. P.11-21.
7. «Chaudes-Aigues: France’s first heating network» Source: <https://www.dhcnews.net/chaudes-aigues-frances-first-heating-network/>
8. «Industrial geothermal energy utilisation celebrates 200 years at Larderello, Italy» Source: Enel Green Power <https://www.thinkgeoenergy.com/industrial-geothermal-energy-utilisation-celebrates-200-years-at-larderello-italy/>
9. Thorsen Jan Eric. Progression of District Heating – 1st to 4th generation / Thorsen Jan Eric, Lund Henrik, Mathiesen Brian Vad // *Environmental Science*. – 2018.
10. Behnaz Rezaie. District heating and cooling: review of technology and potential enhancements / Behnaz Rezaie, Marc A. Rosen // *Applied Energy*. – 2012. – vol. 93. – iss. C. – P. 2-10.
11. Emily Pontecorvo. How to address New York City building emissions? One option: Start with steam. URL: <https://why.org/segments/how-to-address-new-york-city-building-emissions-one-option-start-with-steam/>
12. R. Gordon Bloomquist. Geothermal district heating system analysis, design, and development. URL: [https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2001Romania/bloomquist\\_dh.pdf](https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2001Romania/bloomquist_dh.pdf)
13. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 1<sup>st</sup>Generation. 2016. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-1st-generation-oddgeir-gudmundsson/>
14. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 2<sup>nd</sup>Generation. 2016. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-2nd-generation-oddgeir-gudmundsson/>
15. Sokolov E.Ya. *Teplovye seti*. Gosenergoizdat. 1956.
16. Lieberman N.B., Niankovskaia M.T. Spravochnyk po proektyrovaniiu kotelnykh ustanovok tsentralizovannogo teplosnabzheniia. Energiia, 1979.
17. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 3rd Generation. 2016. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-3rd-generation-oddgeir-gudmundsson/>
18. CASE STUDY | Wireless Temperature Monitoring for Energy Efficiency Optimization. 2020. URL: <https://aranet.com/case-study-wireless-temperature-monitoring-for-energy-efficiency-optimization/>
19. Energy saving in heat supply, ventilation and air conditioning systems Reference manual / L.D. Boguslavsky et al.- M.: Stroyizdat, 1990.-624 p.
20. Calderoni M, Babu Sree Kumar B, Dourlens-Quaranta S, Lennard Z, Rämä M, Klobut K, Wang Z, Duan X, Zhang Y, Nilsson J, and Hargo L. Sustainable District Cooling Guidelines. IEA DHC/CHP Report, 2019. URL: [https://www.ieadhdc.org/fileadmin/documents/Annex\\_XII/2020\\_IEA\\_DHC\\_Sustainable\\_District\\_Cooling\\_Guidelines\\_new\\_design.pdf](https://www.ieadhdc.org/fileadmin/documents/Annex_XII/2020_IEA_DHC_Sustainable_District_Cooling_Guidelines_new_design.pdf)
21. Factsheet: EU Energy System Integration Strategy (July 2020) [Електронний ресурс]. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs\\_20\\_1295](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1295)
22. Heating in Helsinki today. URL: <https://energychallenge.hel.fi/heating-helsinki-today>
23. New, unique heat pump utilising sea water heat to be built in Vuosaari. URL: <https://www.helen.fi/en/news/2019/heat-pump-sea-water-heat-vuosaari>
24. Metodychni rekomendatsii z rozroblennia enerho- ta ekonoefektyvnykh skhem teplopostachannia naselenykh punktiv Ukrainy, zatverdzeni Nakazom Minbudu Ukrainy vid 26.04.2006r. №147.
25. Pryimak O.V., Hlamazdin P.M. “Analiz tekhnichnykh rishen, shcho proponuiutsia pry rozrobtsti optymizovanykh skhem teplopostachannia mist Ukrainy”. *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*. 2011. № 1. S.112-114.
26. Materialy proektu Skhemy teplopostachannia m. Kyieva na period do 2030 roku. URL: <https://dzki.kyivcity.gov.ua/content/zvit-seo-proektu-shemy-teplopostachannya-m-kyieva-do-2030-roku.html>
27. Natsionalnyi plan skorochennia vykydiv vid velykykh opaliuvalnykh ustanovok. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 8 lystopada 2017 roku № 796-r.
28. Teplova enerhiia ta hariache vodopostachannia. URL : <https://www.nerc.gov.ua/>
29. Nakaz vid 30.06.2016 № 188. Pro vnesennia zmin do Instruksii pro poriadok provedennia tekhnichnoi inventaryzatsii obiektiv nerukhomoho maina. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy.
30. *Intehratsiia nizkotemperaturnykh vozobnovliaemykh istochnikov energii v systemy raionnogo energosnabzheniia: Rekomendatsii dlia lits, otvetsvennykh za formirovanie politiki: kratkii obzor*. IRENA, Aalborg University, pri podderzhke Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Abu Dabi: IRENA, 2021. URL: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/Mar/IRENA\\_District\\_Energy\\_Systems\\_Summary\\_2021\\_RU.pdf?la=en&hash=D756F909D10C9ED-BCD700885560390528504EE12](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/Mar/IRENA_District_Energy_Systems_Summary_2021_RU.pdf?la=en&hash=D756F909D10C9ED-BCD700885560390528504EE12)

УДК 697.331

## Новые подходы к организации централизованного теплоснабжения

П. М. Гламаздин<sup>1</sup>, К.О. Баранчук<sup>2</sup>, О. В. Приймак<sup>3</sup>

<sup>1</sup>доцент, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, sib.kiev@gmail.com, ORCID 0000-0003-2611-2687

<sup>2</sup>Зам. директора по научно-технич. вопросам, Danfoss Украина, г. Киев, Украина, kyrylo.baranchuk@danfoss.com

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02opriymak@gmail.com

*Аннотация. Системы централизованного теплоснабжения городов Украины находятся в глубоком кризисе и нуждаются в решительных мерах по выходу из него. Кризис начался ещё в девяностых годах прошлого столетия и постепенно углубляется. Несколько попыток остановить этот процесс и выровнять состояние задекларированных на государственном уровне систем не имели успеха. В то же время в странах Северной Европы начался процесс интенсивного развития подобных систем, причём как теоретически, так и в практической реализации теоретических разработок. Согласно теоретическому анализу жизненного цикла систем централизованного теплоснабжения, они находятся сейчас на четвёртом этапе своего развития в странах Северной Европы. Этот этап имеет основные особенности – это снижение температуры в сети (температурный график), сочетание систем централизованного теплоснабжения с системами централизованного холодоснабжения и их глубокая интеграция в общую энергосистему городов, а также постепенная замена органических топлив на возобновляемые источники энергии. Системы централизованного теплоснабжения в городах Украины находятся на втором этапе развития. Для сохранения конкурентоспособности против децентрализованных систем требуется резкий переход к третьему и хотя бы частично четвёртому этапу развития подобных систем. К сожалению, ни в руководящих органах, ни в широких кругах специалистов этого понимания нет. Внеочередная задача – повышение квалификации руководителей и эксплуатационного состояния городских систем централизованного теплоснабжения и ответственных лиц городских администраций.*

*Ключевые слова: системы централизованного теплоснабжения, низкотемпературные системы; безуглеродная энергетика; возобновляемые источники энергии, энергетические системы.*

УДК 697.331

## New approaches to the organization of district heating

P. Glamazdin, K. Baranchuk, O. Priymak<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, sib.kiev@gmail.com, ORCID 0000-0003-2611-2687

<sup>2</sup> Deputy Director for Science and Technology, Danfoss Ukraine, Kyiv, Ukraine, kyrylo.baranchuk@danfoss.com

<sup>3</sup>Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02opriymak@gmail.com

*Abstract. District heating systems in Ukraine's cities are in deep crisis and need decisive action to overcome it. The crisis began long ago, in the 1990s, and is gradually deepening. Several attempts to stop this process and level the playing field at the state level have failed. At the same time, the process of intensive development of such systems has begun in the countries of Northern Europe. Moreover, both at the theoretical level and in the practical implementation of theoretical developments. According to the theoretical analysis of the life cycle of district heating systems, they are now in the fourth stage of their development in the countries of Northern Europe. This stage has the main features - low temperatures in the network (temperature graph), the combination of district heating systems with district heating systems and their deep integration into the overall energy system of cities, as well as the gradual replacement of fossil fuels with renewable energy sources. District heating systems in the cities of Ukraine are only in the second stage of development. In order to remain competitive against decentralized systems, a sharp transition to the third and at least partially the fourth stage of development of such systems is required. district heating systems are in the active phase of their expansion in European countries and have great prospects for further development, including in Ukraine. District heating systems together with cold supply systems in the process of development are integrated into the energy supply systems of cities and in general in the urban economy. Renewable heat sources will increasingly displace the equipment for combustion of excavated fuel with the prospect of complete abandonment of the latter. In order to preserve the remnants of district heating systems in Ukrainian cities, it is necessary to study and use the experience of the Nordic countries and organize this work at the state level. Unfortunately, neither the governing bodies nor the general public have this understanding. The extraordinary task is to improve the skills of managers and the operational status of city district heating systems and officials of city administrations.*

*Key words: district heating systems, low-temperature systems; carbon-free energy; renewable energy sources, energy systems.*

Надійшла до редакції / Received 15.10.2021



УДК 697.34:628.47:544.3:687.1:008.2

## Проблеми спалювання для теплопостачання сміття від надвиробництва одягу “швидкої моди”

Т. М. Ткаченко<sup>1</sup>, В. О. Мілейковський<sup>2</sup>, Я. Б. Лопатюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф., с.д. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>2</sup>д.т.н., проф., с.д. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, v\_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>3</sup>студент. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, aroslavlopatuk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

*Анотація. На сьогодні одним з джерел енергопостачання є спалювання сміття. Одним з джерел горючого сміття є надвиробництво і стимулювання попиту на одяг. Нова концепція “швидкої моди” полягає у необмеженому здешевленні одягу завдяки максимальному зниженню вартості сировини, оплати праці робітників, умов праці, нехтуванню елементарними правилами безпеки тощо, а з іншого боку – у стимулюванні хижацького попиту на одяг завдяки психологічному впливу на молодь через рекламу, навіювання споживацьких “стандартів” життя на кшталт “кожна подія – інший образ”, пропаганда шопоголізму тощо. Як показали результати досліджень, спалювання бавовняного одягу для теплопостачання можливе. Однак, при цьому продукується значна кількість триатомних (парникових) газів, зокрема вуглекислого газу 102,84 кг/ГДж. За викидом діоксиду вуглецю на одиницю енергії (показник емісії) бавовняна тканина випереджає всі викопні види палива, навіть вугілля – 93,74 кг/ГДж. Таким чином, надмірне продукування сміття через “швидку моду” має більше негативних наслідків для навколишнього середовища аніж користі для теплозабезпечення. Отже, результати роботи підтверджують 12-у мету сталого розвитку – “відповідальне споживання і виробництво”. При цьому пріоритетом є зменшення обсягу продукування сміття. Головним стимулом “швидкої моди” є хижацьке накопичення капіталів виробниками. Подолати це можливо лише шляхом переоцінювання цінностей людей. Зокрема, необхідно формувати ставлення до грошей не як до кінцевої мети, а як до платіжного інструменту для досягнення певних інших життєвих цілей. У такому разі хижацьке накопичення заради накопичення стає беззмисовним. Адже власний добробут, добробут дітей і впевненість у завтра неможливі в умовах низької якості навколишнього середовища та в очікуванні екологічної катастрофи. Дана робота виконана на підтримку міжнародної кампанії “Fashion Revolution” за глобальну індустрію моди, яка зберігає й відновлює навколишнє середовище та цінує людей.*

*Ключові слова: спалювання сміття, “швидка мода”, викид діоксиду вуглецю, сталий розвиток, міжнародна кампанія “Fashion Revolution”.*

**Постановка проблеми.** На сьогодні одним з джерел енергопостачання є спалювання сміття. Одним з джерел горючого сміття є надвиробництво і стимулювання попиту на одяг. Нова концепція модної індустрії “швидка мода” полягає у

- необмеженому здешевленні одягу за рахунок максимального зниження вартості сировини, оплати праці робітників, умов праці, нехтування елементарними правилами безпеки тощо;
- стимулюванні хижацького попиту на одяг завдяки психологічному впливу на молодь через рекламу, навіювання споживацьких “стандартів” життя на кшталт “кожна подія – інший образ”, пропаганді шопоголізму тощо.

Після обвалення у 2013 р. підприємства Рама-Плаза в Бангладеші з багатотисячними жертвами та покаліченими співробітниками проблема умов та охорони праці на таких підприємствах набула широкого резонансу. У 2015 р. було розпочато кампанію “Fashion Revolution”, у рамках якої ці проблеми було

добре висвітлено. Однак, проблема утилізації надлишково виробленої продукції на сьогодні практично не висвітлена.

**Актуальність дослідження.** Проблема утилізації сміття на сьогодні гостро стоїть у багатьох країнах світу. Одним із способів утилізації сміття є спалювання для потреб теплопостачання. З попелу можна видобувати цінні добрива та матеріали. Дим повинен фільтруватися в багатоступеневій системі очищення. На виході буде отримано вуглекислий газ та водяну пару. Швеція закуповує сміття для перероблення. Тому питання, чи варто стимулювати перевиробництво одягу хоча б з точки зору подільшої утилізації для теплопостачання, залишається актуальним.

**Останні дослідження та публікації.** У роботі [1] автори досліджують проблему утилізації сільськогосподарських відходів. І хоча ці відходи вироблено з секвестрованим рослинами вуглекислим газом, спалювання їх призводить до потепління. Особливо це стосується “швидкої моди”, оскільки секвестрація відбувається на сході, а спалювання – на заході. При

певних обсягах виробництва виникатиме перерозподіл концентрації вуглекислого газу. Значно більш перспективним є виробництво матеріалів, наприклад активованого вугілля.

Летюча зола від електростанцій 100 % утилізується у В'єтнамі у багатофункціональні аерогелеві композити для тепло- та звукоізоляції [2]. Ці композити мають густину 45...60 кг/м<sup>3</sup> та коефіцієнт теплопровідності 0,035...0,040 W/(m·K). Летюча зола від спалювання вугілля та жому виявилася цінною сировиною для виробництва фільтрувальних матеріалів задля очищення стічних вод [3].

При спалюванні біомаси та твердих міських відходів виявлено суттєву кількість ціановодню та ацетилену [4], що в подальшому перетворюються на оксиди азоту та частки золи.

Якщо оксиди азоту та сірки можна очищувати у спеціальних фільтрах, то діоксид вуглецю, що є парниковим газом, очистити значно важче [5]. Цей газ обіймає понад 75 % усіх парникових газів у атмосфері [5]. У більшості випадків він викидається без зниження концентрації. Останнім часом у зв'язку з глобальним потеплінням почали розроблятися методи очищення [5]. Найбільш перспективним виглядає адсорбція. Автори роботи [5] пропонують використовувати зольний залишок пальмової олії з котлів заводів. Проблемою адсорбентів є необхідність їхньої утилізації.

Спалювання сміття в окремих містах, що відповідають концепції сталого розвитку, є основним джерелом теплопостачання. Зокрема, у Швеції такий підхід призвів до нестачі сміття і потреби його закупівель в інших країнах [6]. Однак, це призводить до потреби транспортування сміття на великі відстані. При цьому відбувається подвійне забруднення довкілля:

- через додаткове спалювання палива;
- через біохімічні процеси та випаровування рідин у самому смітті;
- через можливі дорожньо-транспортні пригоди за участю транспортних засобів, що перевозять сміття.

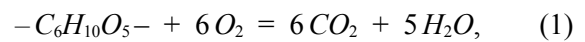
Можу виникнути думка, що надвиробництво одягу може мати і позитивний ефект, зокрема для теплопостачання.

З іншого боку, існують і негативні технічні аспекти, зокрема надмірна продуктивність вуглекислого газу та наявність хімічних домішок. Через таку неоднозначність 12-а мета сталого розвитку [7] – “Відповідальне споживання та виробництво” – передбачає постійне зменшення продукування сміття. Подібні суперечності вимагають детального аналізу задля підтвердження правильності сучасного

напрямку сталого розвитку.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є оцінка позитивних і негативних ефектів при спалюванні надмірно виробленого одягу для теплопостачання.

**Основна частина.** Розглянемо спалювання тканин з кількох аспектів: виділення вуглекислого газу, теплотворна здатність і потреба в енергії на очищення викидів. Найбільш простим прикладом є бавовна. Вона складається [8, 9] на 95 % з целюлози (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>. Припустимо, що на сміттєспалювальному обладнанні досягнуто повного згоряння. Тоді горіння відбуватиметься за формулою на один мономер:



де ризиками показано зв'язки з іншими аналогічними мономерами. Молярні маси кожного компонента формули (1), г/моль, розраховуються додаванням молярних мас [10] хімічних елементів, г/моль, з урахуванням індексів:

- $M_{-C_6H_{10}O_5-} = 162$  г/моль;
- $M_{O_2} = 32$  г/моль;
- $M_{CO_2} = 44$  г/моль;
- $M_{H_2O} = 18$  г/моль.

Тоді з урахуванням коефіцієнтів у формулі (1) на один кілограм спаленої целюлози прийдеться втратити в атмосфері  $6M_{O_2} / M_{-C_6H_{10}O_5-} = 1,19$  кг кисню. Натомість, у навколишнє середовище буде викинуто триатомних газів на одиницю маси целюлози:

- вуглекислого газу  $6 \cdot M_{CO_2} / M_{-C_6H_{10}O_5-} = 1,63$ ;
- водяної пари  $5 \cdot M_{H_2O} / M_{-C_6H_{10}O_5-} = 0,67$ ;
- всього триатомних газів 2,3 кг.

Гази з кількістю атомів три і більше (парникові гази) поглинають променеву теплоту, що може залишити атмосферу, і перетворюють її на явну, що не здатна розсіятися в космос. Це призводить до парникового ефекту.

Наступним кроком слід знайти теплотворну здатність целюлози. За даними роботи [11] вища теплота згоряння целюлози (за умови конденсації всієї утвореної водяної пари) становить  $17,36 \pm 0,01$  МДж/кг. Нижчу теплоту згоряння розрахуємо шляхом віднімання теплоти, потрібної для утворення пароутворення водяної пари. Якщо теплота пароутворення води 2258,2 кДж/кг, а на кожен кілограм целюлози вивільнюється 0,67 кг водяної пари, то теплота для конденсації пари становить  $2258,2 \cdot 0,67 \cdot 10^{-3} = 1,513$  МДж/кг. Нижча теплота згоряння становитиме 15,85 МДж/кг. Отже, на одиницю енергії припадає:

- втрата кисню в атмосфері 75,07 кг/ГДж;
- викид (показник емісії)
- вуглекислого газу 102,84 кг/ГДж;
  - водяної пари 42,27 кг/ГДж;
  - триатомних газів 145,11 кг.

Для порівняння розглянемо викопне паливо. Для визначення викидів вуглекислого газу скористаємося спрощеною методикою, яку розробила державна служба статистики України “з метою заповнення звітів за формою № 2-ГП (повітря) (річна) підприємствами та організаціями, які не отримали дозволи на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря або не перебувають на державному обліку за обсягами потенційних викидів забруднюючих речовин та парникових газів у атмосферу та використовують непромислові установки для спалювання органічного палива (код виробничого, технологічного процесу 120102) з метою обігрівання приміщень” [12]. Дані цієї методики є усередненими і дозволяють ефективно виконувати потрібний аналіз.

Валовий викид забруднювача  $j$  за рік визначається за формулою

$$E_j = 10^{-6} k_j (B_i Q_i'), \text{ т,} \quad (2)$$

де  $k_j$  – показник емісії  $j$ -ї забруднювальної речовини для  $i$ -го палива, г/ГДж;  $B_i$  – витрата  $i$ -го палива за звітний рік, т;  $Q_i'$  – нижча робоча теплота згоряння  $i$ -го палива, МДж/кг.

У дужках формули (2) наведено теплоту згоряння всього палива, спожитого за звітний період, ГДж. Тому дані [12] показника емісії на одиницю енергії не вимагають додаткового перерахунку. Усереднений викид вуглекислого газу на одиницю енергії становить:

- при спалюванні природного газу 58,74813 кг/ГДж;
- при спалюванні мазуту 76,66263 кг/ГДж;
- при спалюванні вугілля 93,74 кг/ГДж.

Таким чином, спалювання одягу призводить до викиду вуглекислого газу на одиницю енергії значно більшого за будь-яке викопне паливо, навіть вугілля (рис. 1). І це за умови, що методику [12] розроблено для децентралізованих установок, ефективність спалювання в яких, зазвичай, нижча ніж на централізованих.

У даних розрахунках також не враховано наявність різних домішок у тканині, які залежать від виробника, кольору тощо. При спалюванні їх виникатимуть додаткові викиди шкідливих речовин. Сміттєспалювання ставить значно вищі вимоги до очищення викидів. Ці установки вимагають додаткових витрат електроенергії, що також не враховано.

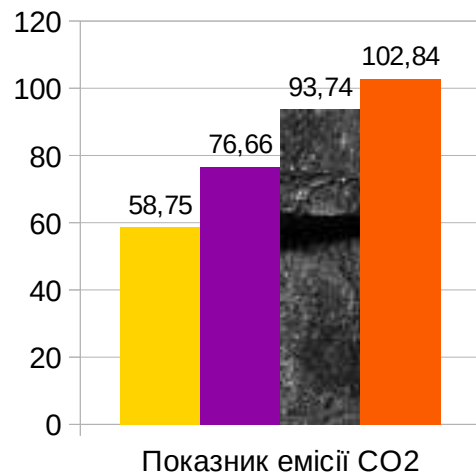


Рис. 1. Виділення вуглекислого газу на одиницю енергії (показник емісії), кг/ГДж:  
жовтий колір – природний газ;  
фіолетовий – мазут;  
сірий – вугілля;  
червоний – целюлоза, бавовна

Отже, першим пріоритетом поліпшення екологічної ситуації має бути мінімізація продукування сміття, а другим – його утилізація. Саме на цих засадах і створено 12-у мету сталого розвитку – відповідальне споживання. Це означає повну відмову від споживацького суспільства і перехід до суспільства сталого розвитку. Це питання не може розглядатися в рамках лише технічних наук. Воно є міждисциплінарним і знаходиться на стику технічних, суспільних наук, психології, педагогіки, філософії тощо.

Споживацтво є способом життя, за якого “людина настільки людина, скільки може спожити”. Подібний підхід вимагає замінювати гардероб для кожної події, постійно оновлювати електронні пристрої тощо. Використання вживаних речей призводить до негативного ставлення як до убогого. Наслідки такого є не лише надвиробництво шкідливого сміття, але й втрата цінності людини як такої. Цінність людини полягатиме не у її внутрішньому стані, а у певних зовнішніх речах, які вона може спожити та викинути на сміття.

Сталий розвиток – протилежний спосіб життя, який передбачає, що “людина настільки людина, скільки може заощадити”. Споживання заради споживання у такому суспільстві є ганебним. Енергоефективність (у розумінні провідних країн світу), тобто заощадження енергії без зменшення обсягу продукції та рівня надання послуг, стає пріоритетом. Тому енергоефективність та захист навколишнього середовища мають починатися саме з переоцінювання життєвих цінностей.

Головним стимулом пропаганди спожива-

цтва є прагнення власників виробництв до хижацького примноження капіталу. Поки капітал є основною метою життя, це питання вирішити в принципі неможливо. Єдиною можливістю вирішити проблему – це змінити ставлення до грошей як до платіжного інструменту, якій дозволяє отримати певні товари та послуги.

Зазначений підхід призведе до переоцінювання цінностей. Адже якщо накопичення капіталу стає проміжною ціллю, а кінцевою метою стає отримання певних благ для себе та дітей, то порушення якості навколишнього середовища стає перепорою на шляху до добробуту. Добробут та упевненість у завтра неможливі в забрудненому середовищі та очікуванні екологічної катастрофи. Як показує практика, слава й визнання часто не прив'язані до капіталу. Повага існує в різних соціальних колах.

Таким чином, вирішення проблем енергоефективності та екологічної безпеки має починатися саме з переоцінювання цінностей та зміни способу життя на засади сталого розвитку. У таких умовах “швидка мода” втрачає

як споживачів, так і виробників.

**Висновки.** Індустрія “швидкої моди” призводить до надмірного продукування сміття. Використання його для теплопостачання можливе, але має більш негативні екологічні наслідки, аніж викопне паливо. Тому 12-а мета сталого розвитку “Відповідальне споживання та виробництво” передбачає як пріоритет зменшення обсягу продукування сміття, і лише у другу чергу – екологічно чисту його утилізацію. Цього неможливо досягти лише технічними засобами. Необхідна зміна життєвих цінностей і пріоритетів від споживачтва до сталого розвитку.

**Перспективи подальших досліджень.** У подальшому доцільно проаналізувати використання сміття від інших тканин для теплопостачання.

**Подяки.** Дана робота виконана на підтримку міжнародної кампанії “Fashion Revolution” за глобальну індустрію моди, яка зберігає й відновлює навколишнє середовище та цінує людей понад зростання та прибуток.

## Література

1. Manoj Kumar Jha. Surface Modified Activated Carbons: Sustainable Bio-Based Materials for Environmental Remediation / Manoj Kumar Jha, Sahira Joshi, Ram Kumar Sharma, Allison A Kim, Bishweshwar Pant, Mira Park, Hem Raj Pant // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11. – Iss. 11. – 3141. <https://doi.org/10.3390/nano11113140>
2. Nga Hoang Nguyen Do. Green Fabrication of Multi-functional Aerogel Composite from Fly Ash and Recycled Plastic Fibers for Heat and Sound Insulation / Nga Hoang Nguyen Do, Oanh Hong Thi Cao, Man Thi Kim Tran, Kien Anh Le, Phung Thi Kim Le // *Chemical Engineering Transactions*. – 2021. – Vol. 89. – P. 25-30. <https://doi.org/10.3303/CET2189005>
3. April Anne S. Tigue. Synthesis of Pervious Geopolymer from Coal Fly Ash and Bagasse Fly Ash for Copper Removal / April Anne S. Tigue, Jacen Mariel S. Catapang, Charles Steven N. Chang, Kenneth A. Collo, Winarto Kurniawan, Hirofumi Hinode, Aileen H. Orbecido, Michael Angelo B. Promentilla // *Chemical Engineering Transactions*. – 2021. – Vol. 88. – P. 817-822. <https://doi.org/10.3303/CET2188136>
4. Wubin Weng. Simultaneous Quantitative Detection of HCN and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> in Combustion Environment Using TDLAS / Wubin Weng, Marcus Aldén, Zhongshan Li // *Indonesian Journal of Chemistry*. – 2021. – Vol. 9. – Iss. 11. – 2033. <https://doi.org/10.3390/pr9112033>
5. Novi Sylvia. Characterization of Bottom Ash Waste Adsorbent from Palm Oil Plant Boiler Burning Process to Adsorb Carbon Dioxide in a Fixed Bed Column / Novi Sylvia, Fitriani Fitriani, Rozanna Dewi, Rizka Mulyawan, Abrar Muslim, Husni Husin, Yunardi Yunardi, Mutia Reza // *Indonesian Journal of Chemistry*. – 2021. – Vol. 21. – No. 6. – P. 1454-1462. <https://doi.org/10.22146/ijc.66509>
6. Зачем Швеция покупает мусор у других стран. <http://talasinvest.com/novosti/831-zachem-shvetsiya-pokupaet-musor-u-drugikh-stran.html>
7. What are the Sustainable Development Goals? <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
8. Материалы для швейных изделий. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 312 с.
9. Мальцева Е.П. Материаловедение швейного производства. 2-е изд., перераб. и доп. / Е.П. Мальцева. – Москва: Легкая и пищевая промышленность. 1983. – 232 с., ил.
10. Шульгін В. Ф. Хімія / В. Ф. Шульгін, М. С. Слободяник, В. О. Павленко та інші. – Харків: Фоліо, 2014. – 958 с.
11. Максимук Ю. В. Высшая теплота сгорания компонентов биомассы / Ю. В. Максимук, З. А. Антонова, В. С. Крук, В. Н. Курсевич, А. С. Корсакова // Свиридовские чтения: сб. ст. / редкол.: О. А. Ивашкевич (пред.) [и др.]. – Минск: Красико-принт, 2020. – Вып. 16. – С. 98-111. <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/256416/1/98-111.pdf>
12. Пояснення щодо розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел для заповнення форми № 2-ТП (повітря) "Звіт про охорону атмосферного повітря" <http://www.te.ukrstat.gov.ua/files/respondent/2tp.pdf>

## References

1. Manoj Kumar Jha, Sahira Joshi, Ram Kumar Sharma, Allison A Kim, Bishweshwar Pant, Mira Park, Hem Raj Pant. "Surface Modified Activated Carbons: Sustainable Bio-Based Materials for Environmental Remediation". *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. Iss. 11. 3141. <https://doi.org/10.3390/nano11113140>
2. Nga Hoang Nguyen Do, Oanh Hong Thi Cao, Man Thi Kim Tran, Kien Anh Le, Phung Thi Kim Le. "Green Fabrication of Multi-functional Aerogel Composite from Fly Ash and Recycled Plastic Fibers for Heat and Sound Insulation". *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 89. P. 25-30. <https://doi.org/10.3303/CET2189005>
3. April Anne S. Tigue, Jacen Mariel S. Catapang, Charles Steven N. Chang, Kenneth A. Collo, Winarto Kurniawan, Hirofumi Hinode, Aileen H. Orbecido, Michael Angelo B. Promentilla. "Tigue. Synthesis of Pervious Geopolymer from Coal Fly Ash and Bagasse Fly Ash for Copper Removal". *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 88. P. 817-822. <https://doi.org/10.3303/CET2188136>
4. Wubin Weng, Marcus Aldén, Zhongshan Li. "Simultaneous Quantitative Detection of HCN and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> in Combustion Environment Using TDLAS". *Indonesian Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 9. Iss. 11. 2033. <https://doi.org/10.3390/pr9112033>
5. Novi Sylvania, Fitriani Fitriani, Rozanna Dewi, Rizka Mulyawan, Abrar Muslim, Husni Husin, Yunardi Yunardi, Mutia Reza. "Characterization of Bottom Ash Waste Adsorbent from Palm Oil Plant Boiler Burning Process to Adsorb Carbon Dioxide in a Fixed Bed Column". *Indonesian Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 21. No. 6. P. 1454-1462. <https://doi.org/10.22146/ijc.66509>
6. Zachem Shvetsiia pokupaet musor u drugikh stran. <http://talasinvest.com/novosti/831-zachem-shvetsiia-pokupaet-musor-u-drugikh-stran.html>
7. What are the Sustainable Development Goals? <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
8. Materialy dlia shveinykh izdelii. 3-e izd.. ispr. i dop. Moskva: Legkaia i pishchevaia prom-st. 1982. 312 s..
9. Maltseva E.P. *Materialovedenie shveinogo proizvodstva. 2-e izd. pererab. i dop.* Moskva: Legkaia i pishchevaia promyshlennost. 1983 g. 232 s. il.
10. V. F. Shulhin, M. S. Slobodanyk, V. O. Pavlenko ta inshi. *Khimiia*. Kharkiv: Folio, 2014. 958 s.
11. Maksimuk Yu. V., Antonova Z. A., Kruk V. S., Kursevich V. N., Korsakova A. S. "Vysshiaia teplota sgoraniia komponentov biomassy". *Sviridovskiiie chteniia: sb. st. / redkol.: O. A. Ivashkevich (pred.) [i dr.]*. – Minsk: Krasiko-print. 2020. Vyp. 16. S. 98-111. <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/256416/1/98-111.pdf>
12. Poiasnennia shchodo rozrakhunku obsiahiv vykydiv zabrudnuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria vid stasionarnykh dzherel dlia zapovnennia formy № 2-TP (povitria) "Zvit pro okhoronu atmosfernoho povitria" <http://www.te.ukrstat.gov.ua/files/respondent/2tp.pdf>

УДК 697.34:628.47:544.3:687.1:008.2

## Проблемы сжигания для теплоснабжения мусора от перепроизводства одежды "быстрой моды"

Т. Н. Ткаченко<sup>1</sup>, В. А. Милейковский<sup>2</sup>, Я. Б. Лопатюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф., с.д. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>2</sup>д.т.н., проф., с.д. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [v\\_mil@ukr.net](mailto:v_mil@ukr.net), ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>3</sup>студент. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [aroslavlopatuk@gmail.com](mailto:aroslavlopatuk@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2105-5951

*Аннотация. На сегодняшний день одним из источников энергоснабжения является сжигание мусора. Одним из источников горючего мусора является перепроизводство и стимулирование спроса на одежду. Новая концепция быстрой моды заключается в неограниченном удешевлении одежды благодаря максимальному снижению стоимости сырья, оплаты труда рабочих, условий труда, пренебрежению элементарными правилами безопасности и т.д., а с другой стороны – в стимулировании хищнического спроса на одежду благодаря психологическому влиянию на молодежь через рекламу потребительских "стандартов" жизни типа "каждое событие - другой образ", пропаганда шопоголизма и т.д. Как показали результаты исследований, сжигание хлопчатобумажной одежды для теплоснабжения возможно. Однако, при этом производится значительное количество трехатомных (парниковых) газов, в частности углекислого газа 102,84 кг/ГДж. По выбросу диоксида углерода на единицу энергии (показатель эмиссии) хлопчатобумажная ткань опережает все ископаемые виды топлива, даже уголь – 93,74 кг/ГДж. Таким образом, чрезмерное производство мусора через "быструю моду" имеет больше негативных последствий для окружающей среды, чем пользы для теплообеспечения. Следовательно, результаты работы подтверждают 12-ю цель устойчивого развития – "ответственное потребление и"*

производство". При этом приоритетом является уменьшение объема производства мусора. Главным стимулом быстрой моды является хищническое накопление капиталов производителями. Преодолеть это можно только путем переоценки ценностей людей. В частности, необходимо формировать отношение к деньгам не как к конечной цели, а как к платежному инструменту для достижения определенных других жизненных целей. В таком случае хищническое скопление ради скопления становится бессодержательным. Ведь собственное благополучие, благополучие детей и уверенность в завтра невозможны в условиях низкого качества окружающей среды и в ожидании экологической катастрофы. Данная работа выполнена в поддержку международной кампании Fashion Revolution за глобальную индустрию моды, которая сохраняет и восстанавливает окружающую среду и ценит людей.

*Ключові слова:* сжигание мусора, "быстрая мода", выброс диоксида углерода, устойчивое развитие, международные кампании "Fashion Revolution".

**UDC 697.34:628.47:544.3:687.1:008.2**

## **Incineration problems for the heat supply using garbage from the overproduction of fast fashion clothing**

T. Tkachenko<sup>1</sup>, V. Mileykovskyi<sup>2</sup>, Ya. Lopatiuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

<sup>2</sup>Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, v\_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

<sup>3</sup>student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, aroslavlopatak@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

*Abstract.* Today, one of the sources of energy supply is waste incineration. One of the sources of combustible waste is overproduction and stimulation of demand for clothing. The new concept of "fast fashion" is to limit the cost of clothing indefinitely by minimizing the cost of raw materials, wages, working conditions, neglect of basic safety rules, etc., and on the other hand - to stimulate predatory demand for clothing through psychological impact on young people through advertising, suggestion consumer "standards" of life such as "every event is a different image", propaganda of shopaholism, etc. According to research results, burning cotton clothes for heating is possible. However, this produces a significant amount of triatomic (greenhouse) gases, in particular carbon dioxide 102.84 kg / GJ. In terms of carbon dioxide emissions per unit of energy (emission index), cotton fabric is ahead of all fossil fuels, even coal - 93.74 kg / GJ. Thus, excessive production of garbage through "fast fashion" has more negative consequences for the environment than benefits for heat supply. Thus, the results confirm the 12th goal of sustainable development - "responsible consumption and production". At the same time, the priority is to reduce the amount of waste production. The main stimulus for "fast fashion" is the predatory accumulation of capital by producers. This can be overcome only by reassessing people's values. In particular, it is necessary to form the attitude to money not as an ultimate goal, but as a payment instrument to achieve certain other life goals. In this case, predatory accumulation for the sake of accumulation becomes meaningless. After all, one's own well-being, children's well-being and confidence in the future are impossible in the conditions of low quality of the environment and in anticipation of an ecological catastrophe. This work was done in support of the international campaign "Fashion Revolution" for the global fashion industry, which preserves and restores the environment and values people.

*Keywords:* garbage incineration, "fast fashion", carbon dioxide emissions, sustainable development, international campaign "Fashion Revolution".

Надійшла до редакції / Received 04.10.2021

УДК 621.431:62-713.3:004.9

## Випробування вентилятора системи охолодження двигуна внутрішнього згорання гелікоптера в умовах жаркого клімату

В. М. Чередніков<sup>1</sup>, О.В. Череднікова<sup>2</sup>, Д. В. Гузик<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> К.т.н., доцент, головний конструктор ТОВ «КБ «Аерокоптер», Полтава, Україна, [polvl@yandex.ru](mailto:polvl@yandex.ru),

ORCID: 0000-0003-1857-3942

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

<sup>3</sup>К.т.н., доцент, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна, [guzikd64@ukr.net](mailto:guzikd64@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2130-951X

*Анотація.* У статті ставиться питання необхідності вирішення проблеми розширення температурних меж роботи системи охолодження двигуна внутрішнього згорання гелікоптера. Дане питання виникло з того, що при експлуатації гелікоптера на території африканських країн з спекотним кліматом відбувався перегрів двигуна. Питання використання гелікоптерів в цих умовах було обумовлено попитом на авіаційному ринку. Для розв'язання поставленої задачі був проведений вибір нових елементів системи охолодження, а саме радіатора та двох типів вентиляторів. Дослідження були направлені на збільшення тепловіддачі радіаторів системи охолодження шляхом збільшення типорозміру радіатора та збільшення швидкості повітряного потоку, який проходив крізь радіатор. Виконувалось 3D моделювання, проектування нової системи охолодження (СО), а потім і конструювання СО в двох варіантах з вентиляторами TEMIC та SPAL. Два дослідних зразка пройшли наземні та льотні випробування спочатку в умовах помірного клімату, де був виявлений зразок з найкращими параметрами роботи. Для льотних випробувань в умовах жаркого клімату була використана нова система охолодження з вентилятором SPAL, ці випробування тривали три дні. Дана стаття описує завершальний етап серії випробувань ефективності системи охолодження гелікоптера та аналіз отриманих результатів з підтвердженням остаточного досягнення поставленої мети, тобто підвищення верхньої температурної межі зовнішнього повітря для безперебійної та безпечної роботи гелікоптера.

*Ключові слова:* система охолодження двигуна, вентилятор, тепловіддача радіатора, експлуатаційна температура.

**Вступ.** Сучасні наукові напрямки у сфері розвитку двигунів транспортних засобів зосереджені на пошуку найбільш енергоефективних та економічних двигунів. Найбільшого розповсюдження набувають гібридні двигуни та електродвигуни для автомобільного транспорту. Для ефективності та стабільності роботи двигуна не останню роль відіграє система охолодження (СО), модернізації якої присвячені роботи багатьох науковців. У випадку малого авіаційного транспорту застосування електричних двигунів обмежено умовами нестабільності роботи таких типів двигунів. Від безперебійності роботи двигуна залежить безаварійна робота авіаційних апаратів. Тому виникає питання модернізації та підвищення характеристик наявних двигунів внутрішнього згорання, які дозволені для встановлення в авіаційних апаратах на території України.

**Актуальність дослідження.** Оскільки малогабаритні гелікоптери користуються попитом в країнах з жарким кліматом, здебільшого африканських країнах, виникає проблема перегріву двигуна при експлуатації літального апарату в умовах з підвищеною температурою навколишнього середовища. Для запобігання підви-

щенню температури двигуна вище допустимих меж потрібно змінити конструкцію системи охолодження двигуна зі збільшенням тепловіддачі від радіатора.

### **Останні дослідження та публікації.**

Теоретичні й практичні аспекти розвитку систем охолодження двигунів висвітлені в працях вітчизняних і зарубіжних вчених: Гащук П. М., Нікіпчук С. В., El-Ladan A.D., Haas O.C.L. та ін.

Українські вчені Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю.Ф., Гащук П.М., Нікіпчук С.В., Долганов К. Є., Тимченко І. І. досліджують термодинамічні процеси, які протікають у двигунах внутрішнього згорання, моделюють окремі процеси та цикли роботи двигуна, роблять пропозиції щодо зміни конструкцій задля підвищення коефіцієнта корисної дії, вносять пропозиції задля розроблення більш економічних систем охолодження тощо. Не останніми актуальними темами є вплив енергетичної ефективності двигунів на екологічні аспекти, бо від цього залежить майбутнє всієї планети. Швидке збільшення автомобільного транспорту на дорогах українських міст має суттєвий вплив на чистоту повітря.

**Формулювання цілей статті.** Метою проведення випробувань гелікоптера з новою

модернізованою системою охолодження безпосередньо в умовах підвищених температур для підтвердження ефективності та безперебійності роботи двигуна, який оснащений такою системою. Також проведення аналізу дослідження роботи системи охолодження для визначення більш чітких меж її використання.

**Основна частина.** Наявна система охолодження двигуна гелікоптера незадовільно працювала при підвищеній температурі навколишнього середовища, що вимагало зміни її конструкції.

Основні етапи для дослідження системи охолодження:

- тривимірне моделювання та розроблення документації на дослідний зразок системи охолодження;
- виготовлення дослідного зразка системи охолодження з встановленням на гелікоптер;
- перевірка ефективності нової системи охолодження в наземних випробуваннях та льотних перевірках на всіх режимах в умовах помірного клімату;
- перевірка ефективності нової СО на льотних перевірках в усіх режимах в умовах жаркого клімату з оцінюванням меж її ефективності;
- аналіз результатів досліджень та оцінка можливості застосування нової СО на гелікоптері та розроблення рекомендацій щодо використання нової СО на гелікоптері.

Перші три етапи детально описано в публікації [1]. В результаті порівняння характеристик елементів системи охолодження для тривимірного моделювання СО був прийнятий радіатор NISSENS 60427 з більшою тепловіддачею ніж існуючий та два типи вентиляторів TEMIC та SPAL (рис.1, 2).

Після проведення наземних та льотних випробувань системи охолодження було зроблено висновок, що більш ефективно працює та підтримує температуру в допустимих межах СО з вентилятором SPAL. Тому на четвертому та п'ятому етапах використано дослідний зразок СО з вентилятором SPAL (рис. 2).

Обладнання та засоби вимірювань, які використовувалися при проведенні випробувань:

- вольтметр із шкалою вимірювань до 20... 25 В та точністю не нижче 0,1 В;
- амперметр M42100;
- вольтамперметр M2044 ТУ 25-7514.106-86 зав.№22097;
- шунт 75ШСММ3-150-0,5 ТУ 4229-001-94077612-06;
- мотор-тестер S7000;

- мотор-тестер ELM327 з можливістю передачі даних через Bluetooth;
- смартфон з встановленим ПЗ OpenDiag, приєднаний і пов'язаний з мотор-тестером ELM327 по Bluetooth;
- система об'єктивного контролю гелікоптера;
- система реєстрації польотних даних;
- обладнання та прилади, штатно встановлені на гелікоптері.

Після успішних випробувань нової СО за умов помірного клімату було прийнято рішення провести випробування за умов спекотного клімату. Для цього в серпні до Африки було відправлено гелікоптер із дослідним зразком СО з вентилятором SPAL. На початку вересня було проведено випробування СО. Основною метою Програми була перевірка ефективності СО в умовах жаркого клімату.

Для проведення випробувань мотор-тестер S7000 замінено на мотор-тестер ELM327 зі смартфоном. З кабіни були демонтовані індикатори, що сигналізували про ввімкнення першого і другого ступенів охолодження.

На час проведення випробувань з двигуна було демонтовано капоти. В іншому склад обладнання, що використовувалося під час випробувань, не відрізнявся від складу обладнання, що застосовувалося при випробуваннях в умовах помірного клімату [1]. Випробування повинні були проводитися у трьох різних часових проміжках:

- перший етап – з 8:00 до 9:00;
- другий етап – з 12:00 до 13:00;
- третій етап – встановлення гелікоптера на льотному майданчику 13:00; польоти – з 15:00 до 16:00, що відповідало різного ступеня нагрівання гелікоптера прямими сонячними променями та різними умовами навколишнього середовища.

На кожному етапі послідовність польотів була однаковою і відповідала програмі польоту при випробуваннях у помірному кліматі. Фактично через погодні умови випробування проводилися протягом 3-х днів – другого, третього і дев'ятого вересня. Також було змінено час проведення етапів випробувань.

Умови проведення випробувань:

- 02 вересня: 1-ий політ (11:45) – температура навколишнього повітря – плюс 41°C;
- 2-ий політ (14:00) – температура навколишнього повітря – плюс 42°C;
- 03 вересня (14:00): – температура навколишнього повітря – плюс 41°C;
- 09 вересня (13:30): – температура навколишнього повітря – плюс 38°C.





Рис. 1. Зібраний та встановлений на гелікоптер дослідний зразок нової СО з вентиляторами TEMIC



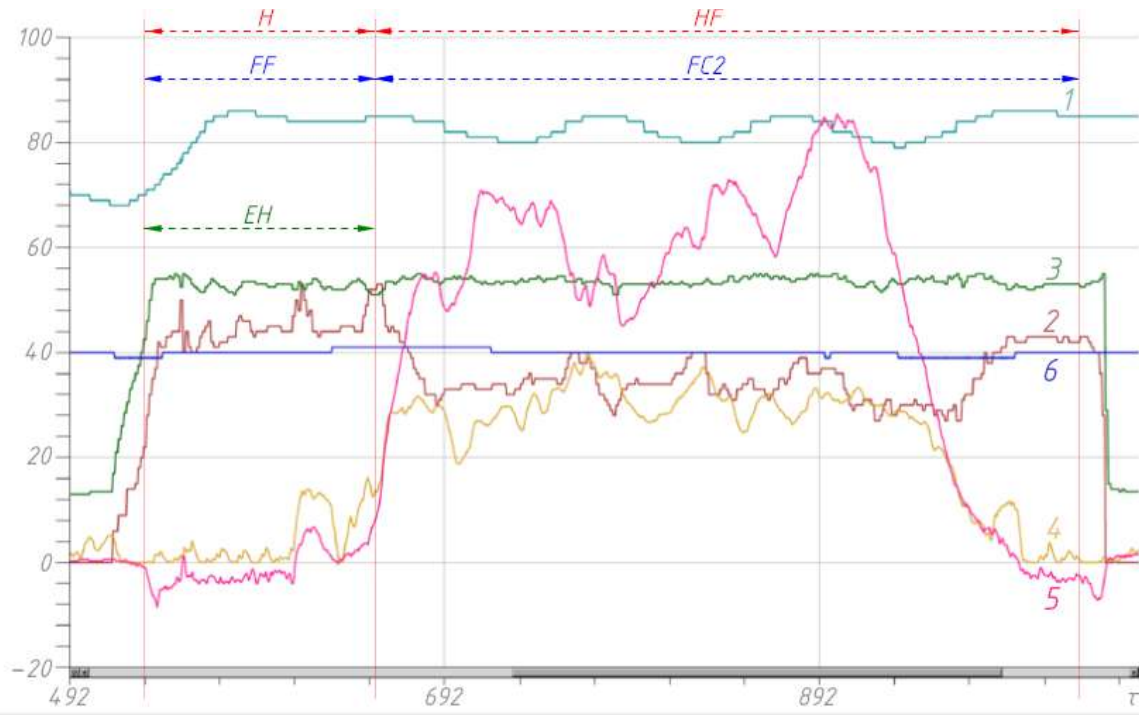
Рис. 2. Зібраний та встановлений на гелікоптер дослідний зразок нової СО з вентиляторами SPAL

Результати льотних випробувань на території Африки представлено на рис. 3-7. У першому польоті 2 вересня (рис. 3) виконувалося коротке висіння, горизонтальний політ та тривале висіння. На короткому висінні вентилятори працювали на повну потужність в режимі теплової рівноваги. Температура на висінні не перевищувала  $87^{\circ}\text{C}$ . У горизонтальному польоті встановився циклічний режим роботи вентиляторів другого ступеня охолодження. Максимальна температура двигуна в горизонтальному польоті була  $86^{\circ}\text{C}$ , а мінімальна –  $79^{\circ}\text{C}$ . Протягом тривалого висіння вентилятори працювали на повну потужність у режимі теплової рівноваги. Температура протягом усього періоду висіння повільно піднімалася до  $93^{\circ}\text{C}$ , після чого зупинилася і далі не зростала. У другому польоті 02 вересня (рис. 4, 5) після стоянки гелікоптера протягом двох

годин під прямими сонячними променями виконано безперервний цикл, що складався з режимів горизонтального польоту (на початку та в кінці) та висіння. На всіх режимах польоту робота СО не відрізнялася від раніше розглянутої. У горизонтальному польоті вентилятори циклічно вмикалися, а на висінні встановилася теплова рівновага. Максимальна температура двигуна на висінні та в горизонтальному польоті дорівнювала  $86^{\circ}\text{C}$  і  $97^{\circ}\text{C}$ , відповідно.

Найбільш важкий цикл випробувань був виконаний 03 вересня (рис. 6). Перед початком випробувань гелікоптер знаходився під прямим сонячним промінням протягом 5-ти годин. Під час випробувань виконували тривале висіння.

Як і раніше, на висінні встановився режим теплової рівноваги. Максимальна температура при цьому дорівнювала  $90^{\circ}\text{C}$ .



Flight time = 1212 s (20:12); T = 1971 s (02:09:2018 9:27:52); View time = 998.5 s (16:26:3)

Рис. 3. Визначення ефективності CO з вентиляторами SPAL в умовах жаркого клімату 02 вересня (1-ий політ, початок):  $\tau$  – час, хв.;  $H$  – висіння;  $HF$  – горизонтальний політ;  $FF$  – робота вентиляторів на повну потужність;  $FC2$  – циклічна робота вентиляторів на другому ступені охолодження;  $EH$  – нагрівання двигуна при висінні та перехід до режиму усталеної теплової рівноваги:

- 1 – температура води охолодження двигуна, °C;
- 2 – відсоток навантаження двигуна, %;
- 3 – частота обертання двигуна, об/хв;
- 4 – приладова швидкість, м/с;
- 5 – висота, м;
- 6 – температура навколишнього повітря, °C



Flight time = 1762.5 s (29:22:30); T = 1590.5 s (02:09:2018 12:25:50); View time = 1481 s (24:21)

Рис. 4. Визначення ефективності CO з вентиляторами SPAL в умовах жаркого клімату 02 вересня (2 -ий політ):  $EC$  – охолодження двигуна в горизонтальному польоті

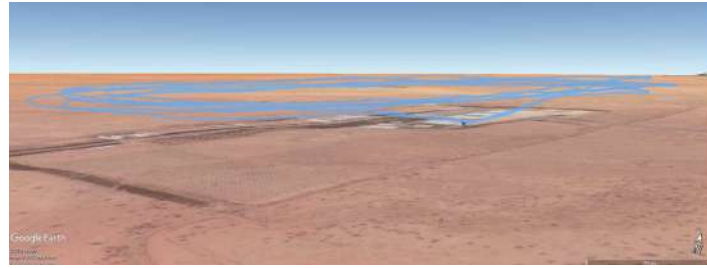


Рис. 5. Трек 2-го польоту при випробуваннях CO із вентиляторами SPAL в умовах жаркого клімату 02 вересня

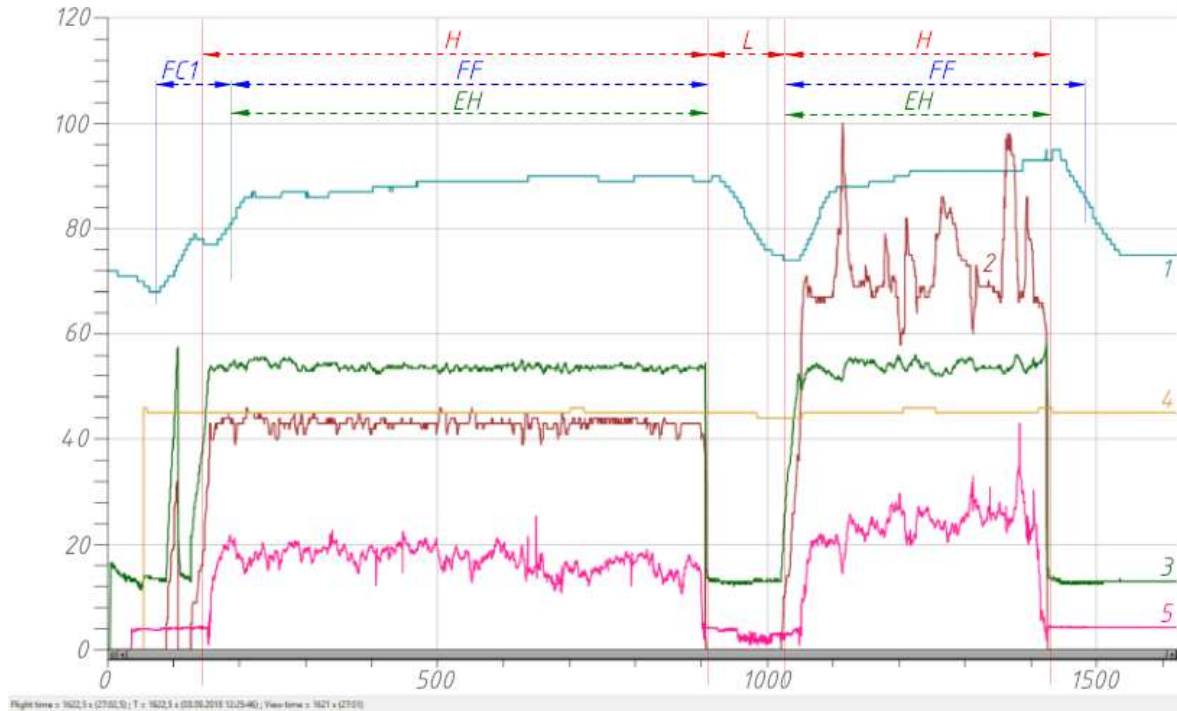


Рис. 6. Визначення ефективності CO з вентиляторами SPAL в умовах жаркого клімату 3 вересня:  
FC1 – циклічна робота вентиляторів першого ступеня охолодження; L – приземлення та охолодження двигуна

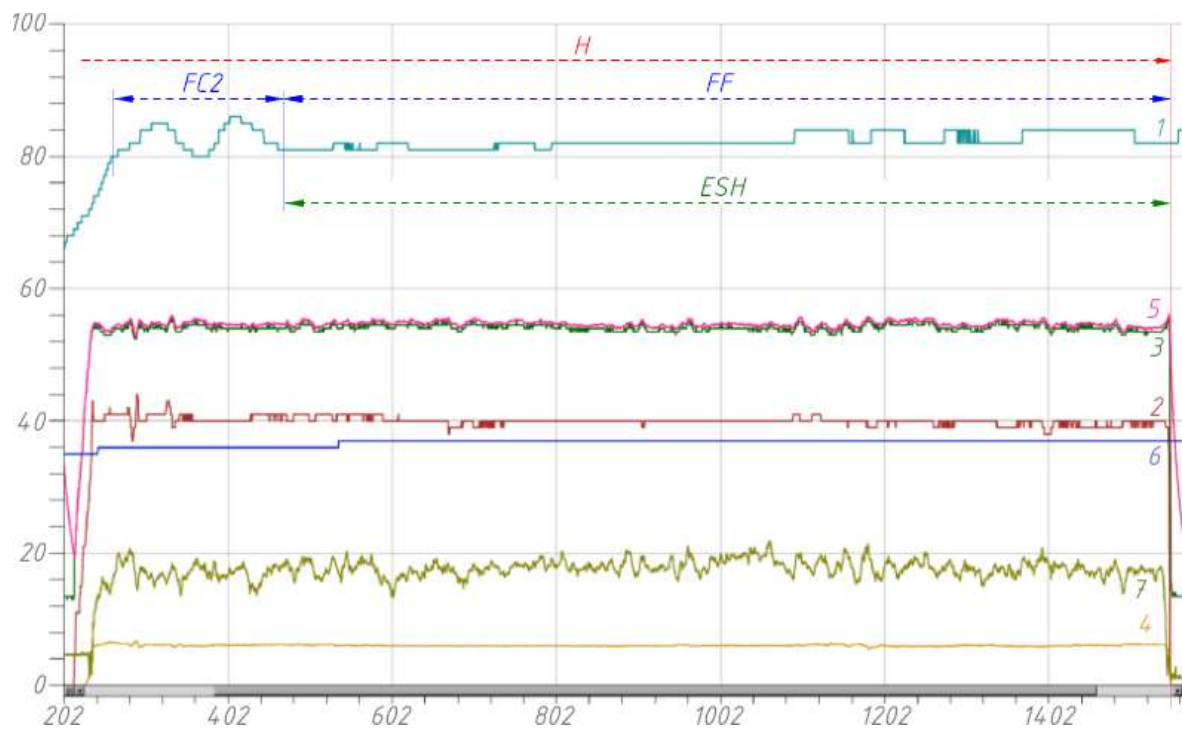


Рис. 7. Визначення ефективності CO з вентиляторами SPAL в умовах жаркого клімату 9 вересня:  
ESH – незначне нагрівання двигуна при висінні та перехід до режиму усталеної теплової рівноваги;  
7 – висота за радіовисотоміром

Через 12,5 хвилин після початку висіння температура головного редуктора піднялася до критичної позначки, тому пілот був змушений здійснити посадку для його охолодження. Після зниження температури головного редуктора продовжили виконувати висіння. У цьому проміжку часу температура двигуна піднялася до 95 °С, що було викликано роботою двигуна на підвищених обертах, вище ніж рекомендовані 5400 об/хв.

Під час показових випробувань 09 вересня (рис. 7) виконувалося тривале висіння. Його тривалість становила 22,5 хв. На початковому етапі висіння вентилятори працювали циклічно, після чого вони увімкнулися на повну потужність, а СО перейшла в режим теплового рівноваги. Максимальна температура двигуна при циклічній роботі була 86 °С, а під час роботи вентиляторів на повну потужність – 84 °С.

Таким чином, випробування нової СО в умовах жаркого клімату підтвердили результати досліджень, отриманих у помірному кліматі, а також висловлені в ньому припущення, та довели можливість її використання за таких умов.

**Висновки** Розроблена нова системи охолодження (СО) виявилася значно ефективнішою за серійну. Двигун охолоджується швидше, а нагрівається повільніше. Тривалість циклу нагрівання-охолодження та перепад температури при охолодженні у нової СО більший.

Вентилятори СО працюють як у циклічному режимі, так і в режимі максимальної потужності. У горизонтальному польоті вентилятори працюють циклічно, а на висінні встановлюється режим теплової рівноваги.

На охолоджувальну здатність СО значний вплив має близькість до землі. На висоті 2-3 м від поверхні землі встановлюється тепла

рівновага. При цьому температура двигуна залишається постійною і лежить у межах від 81 °С та вище. На висоті 810 м тепла рівновага порушується, і двигун починає нагріватися; при обертах двигуна 5200-5400 об/хв висіння на висоті 2-3 м можна виконувати нескінченно довго. Встановлені на двигуні капоти впливають його температуру. Цей вплив стає суттєвим при температурі навколишнього повітря вище 30 °С; після 40 хв. польоту на режимі висіння настає перегрів головного редуктора. СО ефективно охолоджує двигун на висінні та в горизонтальному польоті, а гелікоптер із встановленою на ньому СО з вентиляторами SPAL може експлуатуватися за температури навколишнього повітря до плюс 45 °С. При використанні системи об'єктивного контролю необхідно відмовитися від використання мотор-тестера S7000 та використовувати замість нього мотор-тестер ELM327 зі смартфоном.

Виконаний аналіз довів ефективність нової СО та дав рекомендації щодо її використання на гелікоптері. Результати випробувань підтвердили розширення експлуатаційного діапазону температури навколишнього середовища, тобто збільшення його до плюс 45 °С.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження в напрямку підвищення ефективності системи охолодження двигуна внутрішнього згорання полягають у проведенні більш детального аналізу даних, які отримано в процесі випробувань. Має бути виконано тривимірне моделювання елементів СО. На підставі отриманих експериментальних даних, які дають можливість перевірки відповідності параметрів, можливе створення коректної моделі процесів теплообміну методом скінчених елементів в конструктивних елементах СО.

## Література

1. Чередніков В. М. Моделювання, конструювання та випробування системи охолодження ДВЗ з метою підвищення її ефективності / В. М. Чередніков, О. В. Череднікова // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2021. – Вип. 198. – С. 129 – 147.
2. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. International journal of Automobile and Mechanical Engineering. 2017. 14(4). P. 4649-4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>
3. El-Ladan A.D., Haas O.C.L. Fan-pad evaporative battery cooling for hybrid electric vehicle thermal management. IET. 2015. DOI: 10.1049/cp.2015.0901
4. Нікіпчук С. Аналіз та оптимізація схем суміщення структурних елементів у системах охолодження автотранспортних двигунів / Сергій Нікіпчук // IX міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. 20-22 травня 2009 р.: праці. – Львів, 2009. – С. 271–272.
5. Гашук П. М. Про зміст поняття «Коефіцієнт корисної дії автомобіля» / П. М. Гашук, М. І. Сичевський, А. М. Домінік // Зб. наук. пр. «Вісник ЛДУ БЖД». – Львів, 2016. – № 14. – С. 152–175.
6. Гашук П. Н. Энергетическая эффективность автомобиля / П. Н. Гашук. — Львов: Свит, 1992. — 208 с.

## References

1. Cherednikov V. M. Modeliuvannya, konstruiuvannya ta vyprobuvannya systemy okholodzhennia DVZ z metoiu pidvyshchennia yii efektyvnosti / V. M. Cherednikov, O. V. Cherednikova // Zb. nauk. prats Ukr. derzh. un-tu zaliznykh. transp. – Kharkiv : UkrDUZT, Vyp. 198., 2021, pp. 129–147.
2. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. International journal of Automobile and Mechanical Engineering. 2017. 14(4). P. 4649-4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>
3. El-Ladan A.D., Haas O.C.L. Fan-pad evaporative battery cooling for hybrid electric vehicle thermal management. IET. 2015. DOI: 10.1049/cp.2015.0901
4. Nikipchuk S. Analiz ta optymizatsiia skhem sumishchennia strukturnykh elementiv u systemakh okholodzhennia avtotransportnykh dvyhuniv / Serhii Nikipchuk // IX mizhnarodnyi sympozium ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi. 20-22 travnia 2009.: pratsi, Lviv, 2009, pp. 271-272.
5. Hashchuk P. M. Pro zmist poniattia «Koeffitsient korysnoi dii avtomobilia» / P. M. Hashchuk, M. I. Sychevskiy, A. M. Dominik // Zb. nauk. pr. «Visnyk LDU BZhD».,Lviv, 2016, № 14, pp.152-175.
6. Hashchuk P. N. Energeticheskaya effektivnost avtomobilya /P. N. Hashchuk, Lviv: Svyt, 1992, 208p.

УДК 621.431:62-713.3:004.9

## Испытание системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания вертолета в условиях жаркого климата

В. Н. Чередников<sup>1</sup>, А.В. Чередникова<sup>2</sup>, Д. В. Гузик<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, главный конструктор ООО «КБ «Аэрокоптер», Полтава, Украина, [polvl@yandex.ru](mailto:polvl@yandex.ru),  
ORCID: 0000-0003-1857-3942

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, Национальный университет “Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка”, Полтава, Украина,  
[al.chered108@gmail.com](mailto:al.chered108@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4684-9870

<sup>3</sup>к.т.н., доцент, Национальный университет “Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка”, Полтава, Украина,  
[guzikd64@ukr.net](mailto:guzikd64@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2130-951X

*Аннотация. В статье ставится вопрос необходимости решения проблемы по расширению температурных границ работы системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания вертолета. Данный вопрос возник из того, что при эксплуатации вертолета на территории африканских стран с жарким климатом происходил перегрев двигателя. Вопрос использования вертолетов в этих условиях был обусловлен спросом на авиационном рынке. Для решения поставленной задачи был проведен выбор новых элементов системы охлаждения, а именно радиатора и двух типов вентиляторов. Исследования были направлены на увеличение теплоотдачи радиаторов системы охлаждения путем увеличения типоразмера радиатора и увеличения скорости воздушного потока, проходящего через радиатор. Выполнялось 3D-моделирование, проектирование новой системы охлаждения (СО), а затем и конструирование СО в двух вариантах с вентиляторами TEMIC и SPAL. Два опытных образца прошли наземные и лётные испытания сначала в условиях умеренного климата, где был выявлен образец с наилучшими параметрами работы. Для лётных испытаний в условиях с жарким климатом была использована новая система охлаждения с вентилятором SPAL, эти испытания длились три дня. Данная статья описывает завершающий этап серии испытаний на предмет эффективности системы охлаждения вертолета и анализ полученных результатов с подтверждением окончательного достижения поставленных целей, т.е. повышение верхней температурной границы наружного воздуха для бесперебойной и безопасной работы вертолета.*

*Ключевые слова: система охлаждения двигателя, вентилятор, теплоотдача радиатора, эксплуатационная температура.*

UDC 621.431:62-713.3:004.9

## Testing the cooling system of the helicopter internal combustion engine in hot climates

V. Cherednikov<sup>1</sup>, O. Cherednikova<sup>2</sup>, D. Guzyk<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>PhD. Chief Designer. DB Aerocopter, Poltava, Ukraine, [polvl@yandex.ru](mailto:polvl@yandex.ru),

ORCID: 0000-0003-1857-3942

<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>PhD. Associate Professor. National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, [guzikd64@ukr.net](mailto:guzikd64@ukr.net),

ORCID: 0000-0003-2130-951X

*Abstract. The article discusses the need to solve the problem of increasing the temperature limits of the operation of the cooling system of the internal combustion engine (ICE) of the helicopter. This issue arose from the fact that during the operation of the helicopter on the territory of African countries with a hot climate, the engine overheated. The use of helicopters in these conditions was due to the demand in the aviation market. To solve the problem, new elements of the cooling system were selected, i.e. radiator and two types of fans. The research was aimed at increasing the heat transfer from the radiators of the cooling system by increasing the size of the radiator and increasing the air flow rate through the radiator. 3D modeling, design of a new cooling system (CO), and then design of CO in two versions with TEMIC and SPAL fans were done. First, ground and flight tests for two prototypes in a temperate climate were done, as a result of which a prototype with the best performance parameters was determined. During the tests the equipment and measuring instruments were used: voltmeter; ammeter; voltmeter; shunt; motor tester with the ability to transfer data via Bluetooth; smartphone with OpenDiag software installed, which is included and connected to the motor tester via Bluetooth, helicopter objective control system, flight data registration system, equipment and devices normally installed on the helicopter. For flight tests in hot climates, a new cooling system with a SPAL fan was used, these tests lasted three days. This article describes the final stage of a series of tests for the effectiveness of the cooling system of a helicopter and an analysis of the results obtained with confirmation of the final achievement of the set goals, i.e. raising the upper temperature limit of the outside air for the safe operation of the helicopter.*

*Key words: engine cooling system, fan, radiator heat dissipation, operating temperature.*

Надійшла до редакції / Received 15.10.2021

Наукове видання

# ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 39

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.nbu.gov.ua> національної бібліотеки НАН України ім. В. І. Вернадського та на сайті КНУБА ( <http://vothp.knuba.edu.ua/> ).

Підписано до друку 06.12.2021. Формат 60×84 1/8  
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Умов. друк. арк. 6,9. обл. вид. арк. 7,2.  
Наклад 100 прим. Замовлення № 161823

Надруковано в ТОВ “Видавництво “Юстон”  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36-а т: (044) 360-22-66, [www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)  
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції серія дк № 797 від 09.09.2015 р.

