

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

М.К. Безродний, О.О. Майстренко. Енергоефективність теплонасосно-адсорбційної системи консервування енергетичного обладнання з урахуванням реальних робочих процесів в адсорбційному роторі.....	7
В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, В.В. Олійник. Застосування ймовірнісно-статистичного підходу для побудови електробалансів аміачного цеху.....	20
В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А. Буяк, О.В. Петрученко. Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання.....	32
І.І. Пуховий, М.А. Махров. Система захисту вікон від сонячного випромінювання з одночасним отриманням води для гарячого водопостачання.....	42
Ц. Цзянгоу, Г.Б. Варламов, К.О. Романова, Л. Сюсянг, Л. Джиганг. Оцінка ефективності охолодження повітряного конденсатора при зміні термічного опору трубок.....	49

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Д.Г. Дерев'янку, О.В. Данілін, К.М. Гілевич. Особливості блискавкозахисту наземних сонячних електростанцій в Україні	59
Д.С. Матушкін, А.В. Босак, Л.Я. Кулаковський. Аналіз факторів для прогнозування генерації електричної енергії сонячними електростанціями.....	64
В.А. Степаненко, Ю.А. Веремійчук. Інтегрована система енергозабезпечення із застосуванням вентиляційних систем.....	70

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

А.В. Волошко, Я.С. Бедерак, В.В. Шевчук. Застосування теорії подібності для контролю електроспоживання промислових підприємств.....	78
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

В.П. Грудська, В.І. Чибеліс, В.Ю. Лободзинський. Дослідження автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора.	84
О.М. Терех, В.А. Рогачов, О.В. Баранюк, Ю.В. Жукова, О.І. Руденко. Теплоаеродинамічна ефективність тепловідвідних поверхонь для охолодження елементів електронних пристроїв	89
В.П. Калінчик, В.В. Калінчик, В.А. Побігайло, Д.О. Мельник. Формування складу впливаючих шкідливих і небезпечних факторів виробничої системи.	99

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Н.І. Жукова, А.І. Крючков, С.В. Зайченко, В.Г. Смоляр. Очищення стічних вод від іонів важких металів.	108
Вимоги до оформлення статей	114

CONTENTS

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

M. Bezrodny, O. Maistrenko. Efficiency of heat pump and adsorption system of conservation of energy equipment.....	7
V. Nakhodov, O. Borychenko, V. Oliinyk. Application probabilistic-statistical approach for construction of electrical balances of ammonia department.....	20
V. Deshko, I. Bilous, N. Buyak, O. Petruchenko. Analysis of the influence of energy efficient heating modes on buildings energy use basing on the mathematical modeling.....	32
I. Puhoviy, M. Makhrov. Solar radiation protection system with simultaneous hot water supply	42
J. Jianguo, G. Varlamov, K. Romanova, L. Suxiang, L. Zhigang. Influence of thermal resistance of air condenser tubes on steam cooling efficiency	49

SUSTAINABLE ENERGY

D. Derevianko, O. Danilin, K. Hilevych. Peculiarities of lightning protector of ground solar power plants in Ukraine.....	59
D. Matushkin, A. Bosak, L. Kulakovskiy. Analysis of factors for forecasting electric power generation by solar power plants... ..	64
V. Stepanenko, Y. Veremiichuk. Integrated energy supply system with the use of ventilation systems	70

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

A. Voloshko, Ya. Bederak, V. Shevchuk. Application of the theory of similarity to control electric consumption industrial enterprises	78
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

V. Grudska, V. Chybelis, V. Lobodzinskiy. Research of the automatic regulator of the input voltage stabilizer of an autonomous inverter.....	84
A. Terekh, V. Rogachov, A. Baranyuk, Yu. Zhukova, A. Rudenko. Heat aerodynamic efficiency of heating surfaces for cooling of electronic device elements	89
V. Kalinchyk, V. Kalinchyk, V. Pobigaylo, D. Melnyk. Formation of the composition of influential harmful and dangerous factors of the production system.....	99

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

N. Zhukova, A. Kryuchkov, S. Zaichenko, V. Smoliar. Wastewater treatment from heavy metal ions	108
Requirements for the articles	114

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 62.768+62.747+62.744

М.К. Безродний, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3500-5165
О.О. Майстренко, аспірант, ORCID 0000-0003-1961-7548
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОНАСОСНО- АДСОРБЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОНСЕРВУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ РЕАЛЬНИХ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В АДСОРБЦІЙНОМУ РОТОРІ

В роботі виконано аналіз енергетичної ефективності теплонасосно-адсорбційної системи консервування енергетичного обладнання з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря в адсорбційному роторі в порівнянні з енергоефективністю стандартної системи з електричним нагрівачем регенераційного повітря. В результаті аналізу показано, що теплонасосно-адсорбційна система є багаторазово більш енергоефективною за умови не тільки теоретичних, але і реальних (неізоентальпійних) робочих процесів в адсорбційному роторі. Показано також, що існують оптимальні значення температури регенераційного повітря після конденсатора теплового насоса на вході в ротор, при яких енергетична ефективність теплонасосно-адсорбційної системи досягає максимальних значень. Встановлено, що оптимальні значення температури регенераційного повітря змінюються в вузькому діапазоні (на рівні 60... 65 °С), а максимальні значення коефіцієнта енергоефективності суттєво зменшуються для стандартної системи з електронагрівачем і збільшуються для теплонасосно-адсорбційної системи при зменшенні температури навколишнього повітря.

Ключові слова: захист металевих обладнання від корозії, консервування енергетичного обладнання, осушення повітря, адсорбційний осушувач, тепловий насос.

Вступ. Захист металевих конструкцій від корозії – актуальна проблема сучасної енергетики. Більшість аварійних ситуацій та фінансових витрат при експлуатації енергетичного обладнання спричинені саме дією корозії, оскільки обладнання експлуатується при високих температурах та значних надлишкових тисках. Будь-яка частина обладнання, яка піддалась дії корозії, є потенційною причиною виходу з ладу всієї установки. В сучасних умовах енергетичне обладнання працює в маневровому режимі і має тривалі періоди простою. Саме в цей час необхідно зберігати обладнання від дії стоячої корозії як найбільш небезпечного її прояву. За відсутності заходів зі збереження обладнання термін його експлуатації знижується, та зростають фінансові витрати на ремонтні роботи і амортизаційні відрахування [1]. Волога повітря є основним каталізатором процесу корозії, при цьому чим вище відносна вологість повітря, тим швидше руйнування металевих частин обладнання [2]. Але за низької відносної вологості повітря (нижче 40 %) процеси корозії майже зупиняються і не руйнують метал, тому для якісного збереження енергетичного обладнання необхідно підтримувати відносну вологість повітря, яке контактує з металом, на рівні нижче 40 % [3]. Існує багато способів осушення повітря, які мають різноманітну фізику процесу. До основних методів осушення повітря відносяться: конденсаційний, адсорбційний, абсорбційний та мембранний способи [4].

Конденсаційний спосіб заснований на охолодженні повітря з подальшим видаленням вологи. Реалізується даний метод, зазвичай, з використанням теплового насоса. Для видалення вологи повітря пропускають спочатку через випарник теплового насоса, де повітря охолоджується та частково осушується,

© М.К. Безродний, О.О. Майстренко, 2020

далі повітря пропускається через конденсатор, де нагрівається, і паралельно з чим зменшується відносна вологість повітря. Даний метод має два суттєвих недоліки – надзвичайно складно досягти відносно вологості робочого повітря на рівні нижче 35–50% та неможливість осушення повітря з відносною вологістю нижче 35%. Перевагою даного методу є невисоке споживання електричної енергії на осушення повітря за відносною вологості повітря в 60 % та вище.

Адсорбційний метод заснований на властивості твердих сорбентів поглинати вологу з повітря. Існує два основних різновиди: осушення стисненого повітря при проходженні через товщу силікагелю та осушення повітря за атмосферного тиску при проходженні через адсорбційний ротор. Перший спосіб заснований на властивості деяких адсорбентів поглинати вологу зі стиснутого повітря та віддавати поглинуту вологу повітрю при більш низькому тиску. Для реалізації даного методу створюють спеціальне обладнання, яке має дві ємності з адсорбентом. Повітря, яке осушується, проходить через одну ємність, а частина від даного повітря розширюється та направляється в іншу ємність, де регенерує адсорбент. За рахунок попереминого руху повітря через ємності досягається безперервне осушення стиснутого повітря. Даний спосіб осушення повітря має вузьке застосування – осушення стиснутого повітря. Для осушення великої кількості повітря, яке необхідне за атмосферного тиску, даний метод не підходить через значні витрати електричної енергії на стиснення повітря.

Другий різновид адсорбційного осушення заснований на властивості силікагелю віддавати поглинуту вологу підігрітому регенераційному повітрю. В даному способі силікагель сформований у ротор, який обертається. Даний ротор розділений на два сектори. Через $\frac{3}{4}$ частини перерізу ротора проходить повітря, яке осушується і підігрівається, а через $\frac{1}{4}$ проходить підігріте регенераційне повітря, яке зволожується та охолоджується. При цьому процес осушення повітря безперервний. Даний спосіб дозволяє отримати повітряну суміш з температурою точки роси до -40°C , тобто може забезпечити глибоке осушення повітря. Але існує і один недолік – високі витрати електричної енергії на підігрів регенераційного повітря.

Також існує абсорбційний метод осушення повітря. Даний спосіб заснований на властивості концентрованого розчину поглинати вологу з повітря. Для реалізації даного методу створюють обладнання з двома зрошувальними камерами. В першій камері концентрований розчин контактує з повітрям, яке осушується, при цьому поглинається волога з повітря. Далі розчин направляється у другу зрошувальну камеру, де продувається гарячим регенераційним повітрям і випаровується. Після упарювання розчин охолоджується та направляється у першу зрошувальну камеру і цикл повторюється. Процес осушення повітря відбувається безперервно. Даний спосіб має високі витрати теплоти на регенерування розчину, значні габаритні розміри, і основне – пов'язаний з використанням агресивних водних розчинів, що є небезпечними для людини та металу. Також надзвичайно складно забезпечити глибоке осушення повітря за рахунок абсорбування вологи.

Мембранна технологія осушення повітря заснована на властивості мембран селективно пропускати молекули вологи, при цьому не пропускати повітря. Дана технологія реалізується за рахунок проходження стиснутого повітря через спеціальний пристрій, в якому потік вологого повітря розділяється на осушене повітря та паро-повітряну суміш, яка видаляється. Недоліком даного способу є великі витрати електричної енергії на стиснення повітря і подальше його проходження через мембрани.

Для реалізації системи консервування енергетичного обладнання всі технології, які мають у своєму складі процес стиснення повітря, не підходять, оскільки затрати енергії на стиснення великих об'ємів повітря є значними. Інші методи, як видно із вищенаведеного аналізу, також мають суттєві недоліки, що обмежують області їх використання. Найбільш придатною для зазначеної мети є адсорбційна технологія осушення повітря (заснована на використанні силікагелевого ротора), оскільки не має більшості недоліків і дозволяє проектувати установки, які можуть забезпечити надзвичайно низьку відносну вологість (до температури точки роси в -40°C). Разом з тим слід відмітити, що енергетична ефективність адсорбційних осушувачів досить низька внаслідок повної втрати теплоти зволоженого регенераційного повітря, що викидається в атмосферу. Саме даний чинник є основним стримуючим фактором до широкого використання адсорбційних осушувачів у технологіях консервування. Тому для забезпечення високої енергетичної ефективності адсорбційної технології осушення при одночасному забезпеченні низької вологості робочого повітря запропонована теплонасосно-адсорбційна система осушення, яка поєднує переваги адсорбційного осушувача та теплового насосу.

Термодинамічний аналіз енергоефективності роботи такої системи був виконаний в роботі [5] за умови теоретичних (ізоентальпійних) процесів осушення робочого повітря та зволоження регенераційного повітря в адсорбційному роторі. Реальні процеси осушення та зволоження повітря в реальних конструкціях адсорбційних роторів суттєво відрізняються від ідеальних процесів при $h=const$ і можуть бути визначені для стандартних роторів за існуючою методикою. В зв'язку з цим виникає питання впливу цих реальних процесів на кінцеву енергетичну ефективність роботи теплонасосно-адсорбційної системи осушення повітря для умов консервування енергетичного обладнання.

Мета роботи. Метою проведеної роботи є визначення впливу реальних процесів осушення робочого і зволоження регенераційного повітря в стандартних адсорбційних роторах на енергетичну ефективність теплонасосно-адсорбційної системи осушення повітря, що використовується для консервування енергетичного обладнання.

Опис роботи схеми. Принцип роботи адсорбційного осушувача заснований на властивості селікагелю поглинати вологу з повітря при відносно низьких температурах ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +40\text{ }^{\circ}\text{C}$), та віддавати адсорбовану вологу гарячому регенераційному повітрю ($+60\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для забезпечення безперервного процесу осушення робочого повітря та регенерування адсорбенту створюють спеціальний ротор (рис.1). Даний ротор має сотову структуру, що збільшує поверхню контакту і полегшує проходження повітря через об'єм селікагелю. Ротор поділений на дві зони, із співвідношення 1 до 4, через більшу зону проходить робоче повітря, яке осушується і підігрівається, а через меншу зону - попередньо підігріте регенераційне повітря, яке випаровує вологу з ротора, зволожується та охолоджується.

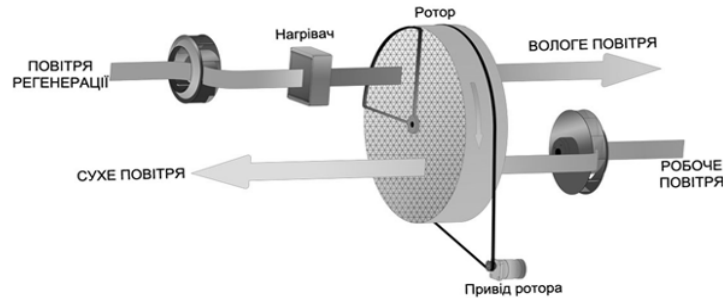


Рисунок 1– Принцип роботи адсорбційного осушувача повітря

На рис.2 представлена теплонасосно-адсорбційна схема консервування енергетичного обладнання. В цій схемі для забезпечення глибокого осушення повітря, як консервуючого агента, використовується селікагелевий адсорбційний ротор, а для підігріву і високоефективного регенерування теплоти регенераційного повітря застосовано тепловий насос, з частковою рециркуляцією регенераційного повітря, що суттєво зменшує споживання енергії в порівнянні з електричним нагрівом.

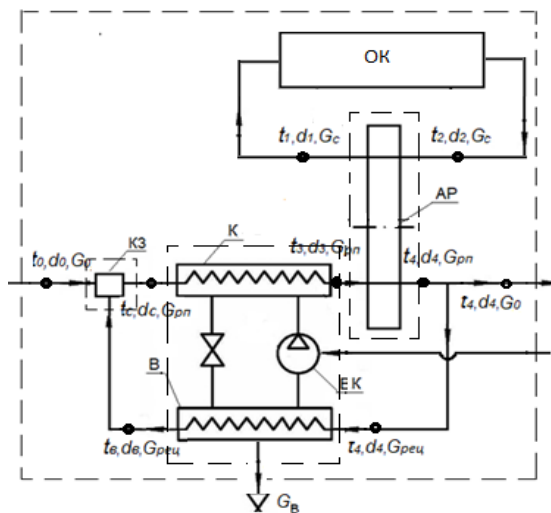


Рисунок 2– Принципова теплонасосно-адсорбційна схема осушування повітря в системі консервування металевих обладнання: К – конденсатор ТН; В – випарник ТН; ЕК – компресор; АР – адсорбційний ротор; КЗ – камера змішування; ОК – об'єкт консервування.

Принцип роботи схеми полягає в наступному. В верхній частині рисунка показаний об'єкт консервування (ОК), із якого вологе (робоче) повітря подається в адсорбційний ротор, підігрівається, осушується і з температурою t_1 та вологовмістом d_1 знову надходить в ОК. В нижній частині рисунка наведена схема підготовки, подачі в ротор і відведення з нього регенераційного повітря. При цьому зовнішнє повітря (0) з температурою t_0 , вологовмістом d_0 і масовою витратою G_0 забирається із

зовнішнього середовища та подається в камеру змішування, де змішується з рециркуляційним регенераційним повітрям (6), яке надходить після випарника теплового насоса з температурою t_b , вологовмістом d_b і масовою витратою G_b . Після змішування повітряна суміш (7) подається в конденсатор теплового насоса, де підігрівається до температури t_3 (3) і подається в ротор для його регенерації і видалення адсорбованої вологи. При проходженні через ротор регенераційне повітря охолоджується та зволожується. Після ротора регенераційне повітря (4) з температурою t_4 та вологовмістом d_4 розділяється на два потоки, один з яких викидається в оточуюче середовище (8), а інший (рециркуляційний) через випарник теплового насоса (5), де охолоджується і частково осушується, подається в камеру змішування, де змішується зі свіжим повітрям.

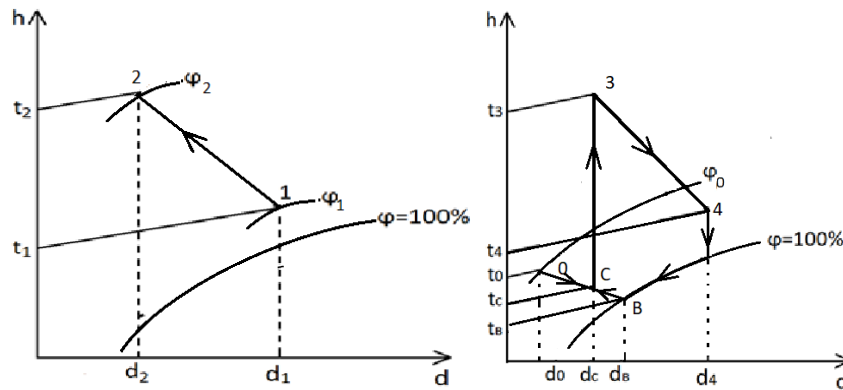


Рисунок 3 – Процес осушення робочого повітря при проходженні через адсорбційний ротор

Рисунок 4 – Процес підготовки та зміни стану регенераційного повітря при проходженні через адсорбційний ротор та ТН

На рисунках 3 і 4 представлені робочі процеси осушення робочого та зміни стану регенераційного повітря в елементах теплонасосно-адсорбційної установки в h-d діаграмі вологого повітря.

Аналіз енергоефективності роботи схеми з ідеальним ротором

Термодинамічний аналіз енергоефективності роботи схеми, представленої на рис. 2, був виконаний в роботі [5] за умови теоретичних процесів осушення робочого повітря та зволоження регенераційного повітря в адсорбційному роторі. При цьому було прийнято, що процеси 1-2 та 3-4 протікають при постійній ентальпії, тобто за умови $h_1 = h_2$ і $h_3 = h_4$. За цих умов на основі рівнянь теплового і матеріального балансів окремих елементів (Рис. 2) і схеми в цілому була складена модель системи, числова реалізація якої дозволила визначити залежності параметрів повітря в вузлових точках схеми, коефіцієнта рециркуляції регенеративного повітря і коефіцієнта перетворення ТН, що забезпечують задані параметри рециркуляційного повітря на вході в адсорбційний ротор. Як результат аналізу отримані залежності від температури свіжого повітря для коефіцієнта енергоефективності теплонасосно-адсорбційної установки. При цьому показано, що така схема і за таких умов є енергоефективною, а її ефективність зростає зі зниженням температури свіжого повітря і зі зменшенням температури регенеративного повітря на вході в адсорбційний ротор з $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Аналіз енергоефективності схем осушення робочого повітря з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря в адсорбційному роторі. При розрахунках теоретичної системи консервування енергетичного обладнання було припущено, що процес осушення та зволоження повітря в адсорбційному роторі відбувається при сталій ентальпії, чого не відбувається в реальному процесі. Реальний процес у роторі відбувається зі зміною ентальпії повітряних потоків, оскільки проходять теплообмінні процеси між нагрітим регенераційним повітрям і ротором, та між ротором і відносно прохолодним робочим повітрям. В даному випадку адсорбційний ротор виступає в ролі низько ефективного рекуператора, що при вирішенні задачі осушення повітря є небажаним.

Коефіцієнт ефективності роботи адсорбційного ротора як рекуператора складає 5-8 %, в залежності від параметрів роботи ротора. Для процесів осушення повітря ротор обертається з частотою 6-15 об/год, що є надзвичайно низьким значенням для роботи в якості рекуператора теплоти, однак дана частота обертання ротора є найбільш ефективною для видалення вологи з повітря та відновлення ротора.

На рисунку 5 представлено графік осушення *робочого* повітря, тобто зміни параметрів *робочого* повітря при проходженні через адсорбційний ротор. Виходячи із даного рисунку, можна зробити висновок,

що процес осушення робочого повітря відбувається не ізоентальпійно, а проходить із певним збільшенням ентальпії повітря.

На рисунку 6 представлено графік зміни стану та параметрів *регенераційного* повітря при проходженні через адсорбційний ротор та теплонасосну установку. Із рисунку видно, що процес осушення ротора та зволоження регенераційного повітря, також проходить не ізоентальпійно, а з деякою втратою ентальпії, яка передається робочому повітря через адсорбційний ротор.

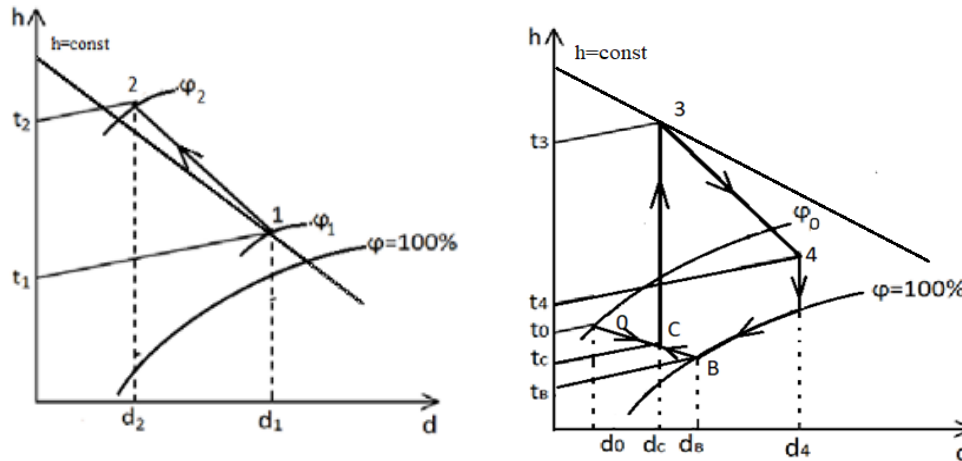


Рисунок 5– Реальний процес осушення робочого повітря при проходженні через адсорбційний ротор з урахуванням необоротностей у всіх елементах системи.

Рисунок 6– Реальний процес підготовки та зміни стану регенераційного повітря при проходженні через адсорбційний ротор та ТН з урахуванням необоротностей у всіх елементах системи.

Дана, вище вказана, особливість робочих процесів в роторі, впливає з того, що адсорбційний ротор є не тільки сорбентом вологи, а і низькоєфективним рекуператором теплоти. Передача теплоти від регенераційного повітря до робочого повітря відбувається безперервно, оскільки адсорбційний ротор безперервно обертається та передає потік теплоти. Кількість переданої теплоти залежить від декількох факторів:

- різниці температур між нагрітим регенераційним повітрям та робочим повітрям на вході в ротор, чим вище різниця температур, тим вищою є передача теплоти;
- швидкості обертання адсорбційного ротора, чим вища швидкість обертання, тим вищий тепловий потік;
- форми та розміру сотової структури адсорбційного ротора.

Теоретичний розрахунок енергоефективності системи осушення робочого повітря з урахуванням реальних (неізоентальпійних) процесів в адсорбційному роторі являє собою вельми складну задачу, оскільки дані для параметрів на виході з ротора в реальних процесах осушення робочого і зволоження регенераційного повітря ми не можемо обрахувати теоретично. Однак ці параметри повітря при заданих параметрах на вході в ротор ми можемо отримати при використанні спеціалізованого програмного забезпечення виробника адсорбційних осушувачів COTES [6]. Використовуючи ці дані, енергоефективність теплонасосно-адсорбційної схеми осушення робочого повітря можна розрахувати за методикою, що розроблена в роботі [5] для теоретичного ротора.

Нижче наведені результати розрахунків параметрів робочого і регенераційного повітря на виході з ротора, виконаних за допомогою програмного забезпечення [6] з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря, для двох варіантів виконання системи: стандартної адсорбційної системи з електричним нагрівачем регенераційного повітря і теплонасосно-адсорбційної системи. Розрахунки проведені для двох типорозмірів адсорбційного ротора діаметром 650 мм і товщиною 100 і 200 мм. При цьому були прийняті наступні вихідні параметри повітря на вході в ротор:

- температура робочого повітря перед входом в ротор 20 °С;
- вологовміст робочого повітря перед входом в ротор 5,8 г/кг.с.п. (відповідає 40% відносної вологості повітря);
- температура регенераційного повітря змінювалась в діапазоні від 50 °С до 100 °С;
- вологовміст регенераційного повітря для стандартної системи відповідає 50 % відносної вологості повітря за температури оточуючого середовища, в якому встановлюється обладнання;

- вологовміст регенераційного повітря для теплонасосно-адсорбційної системи підтримувався за допомогою ТН на постійному рівні і складав 10 г/кг.с.п.

Результати розрахунків для ротора товщиною 100 мм. Нижче в таблицях 1, 2, 3 наведені результати розрахунків параметрів повітря на виході з ротора товщиною 100 мм для стандартної адсорбційної системи з використанням електричного калорифера, як єдиного джерела нагріву регенераційного повітря.

Таблиця 1 – Залежність вологівмісту регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря на вході в ротор та температури оточуючого середовища.

t ₃ , °C	Температура оточуючого повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	7.65	8.07	8.630	9.390	10.440	11.860	13.910
55	8.41	8.85	9.420	10.210	11.280	12.740	14.830
60	9.18	9.63	10.230	11.030	12.140	13.630	15.750
65	9.96	10.42	11.040	11.870	13.000	14.520	16.680
70	10.73	11.21	11.840	12.690	13.850	15.400	17.600
75	11.49	11.99	12.640	13.510	14.960	16.270	18.510
80	12.23	12.74	13.410	14.300	15.510	17.120	19.400
85	12.94	13.46	14.140	15.050	16.290	17.930	20.250
90	13.59	14.13	14.820	15.760	17.020	18.700	21.050
95	14.18	14.73	15.440	16.400	17.690	19.400	21.790
100	14.7	15.26	15.990	16.970	18.280	20.300	22.470

Таблиця 2 – Залежність температури регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря на вході в ротор та температури оточуючого середовища

t ₃ , °C	Температура оточуючого повітря						
	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
50.0	41.0	42.0	42.0	43.0	44.0	45.0	47.0
55.0	42.0	42.0	43.0	44.0	44.0	46.0	47.0
60.0	42.0	43.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0
65.0	42.0	43.0	43.0	44.0	45.0	46.0	48.0
70.0	43.0	43.0	44.0	45.0	45.0	47.0	48.0
75.0	43.0	44.0	44.0	45.0	46.0	47.0	49.0
80.0	44.0	44.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0
85.0	44.0	45.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0
90.0	45.0	45.0	46.0	46.0	47.0	48.0	50.0
95.0	45.0	46.0	46.0	47.0	48.0	49.0	50.0
100.0	46.0	46.0	47.0	47.0	48.0	49.0	51.0

Таблиця 3 – Залежність вологівмісту робочого повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища

t ₃ , °C	Температура оточуючого повітря						
	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
50.0	1.54	1.61	1.69	1.80	1.93	2.10	2.31
55.0	1.48	1.55	1.63	1.74	1.87	2.03	2.24
60.0	1.43	1.50	1.58	1.68	1.81	1.97	2.18
65.0	1.38	1.44	1.52	1.62	1.75	1.91	2.11
70.0	1.32	1.39	1.46	1.57	1.69	1.85	2.05
75.0	1.27	1.33	1.41	1.51	1.64	1.79	1.99
80.0	1.22	1.28	1.36	1.46	1.58	1.73	1.93
85.0	1.17	1.23	1.31	1.40	1.53	1.68	1.87
90.0	1.12	1.18	1.26	1.35	1.47	1.62	1.81
95.0	1.07	1.13	1.21	1.30	1.42	1.57	1.75
100.0	1.03	1.09	1.16	1.25	1.37	1.51	1.70

З урахування отриманих параметрів повітря на виході з реального ротора за методикою, наведеною в роботі [5] була розрахована енергетична ефективність стандартної системи в залежності від температури регенераційного повітря на вході в ротор і температури оточуючого повітря. Результати розрахунків наведені в таблиці 4 і на рис. 7.

Таблиця 4 – Залежність загального коефіцієнту ефективності роботи стандартної адсорбційної системи від температури зовнішнього повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 100 мм.

t ₃ , °C	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	0.300	0.320	0.340	0.356	0.368	0.369	0.363
55	0.307	0.327	0.345	0.362	0.375	0.379	0.380
60	0.314	0.333	0.351	0.367	0.381	0.387	0.391
65	0.320	0.338	0.356	0.372	0.386	0.394	0.400
70	0.325	0.343	0.360	0.376	0.390	0.399	0.407
75	0.329	0.347	0.364	0.379	0.393	0.402	0.412
80	0.332	0.349	0.366	0.381	0.394	0.404	0.415
85	0.334	0.350	0.366	0.381	0.395	0.405	0.416
90	0.334	0.350	0.365	0.380	0.393	0.404	0.415
95	0.333	0.348	0.363	0.377	0.390	0.400	0.412
100	0.330	0.344	0.359	0.372	0.385	0.394	0.407

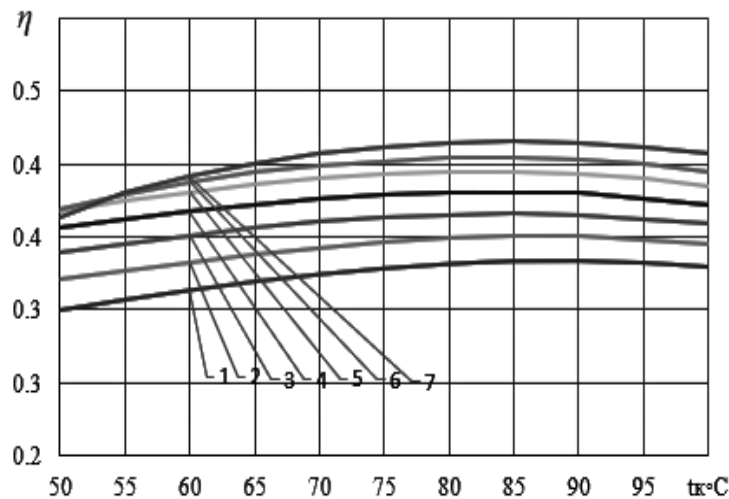


Рисунок 7 - Залежність реального коефіцієнту енергетичної ефективності η стандартної адсорбційної системи від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 100 мм: 1- $t_0=0\text{ }^\circ\text{C}$, 2- $t_0=5\text{ }^\circ\text{C}$, 3- $t_0=10\text{ }^\circ\text{C}$, 4- $t_0=15\text{ }^\circ\text{C}$, 5- $t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$, 6- $t_0=25\text{ }^\circ\text{C}$, 7- $t_0=30\text{ }^\circ\text{C}$

Як видно з рис. 7, чим вища температура свіжого повітря, тим вищий коефіцієнт ефективності системи, що обумовлено нижчим енергоспоживанням електричного нагрівача на підігрів регенераційного повітря в калорифері. Крім того видно, що за температур регенераційного повітря на вході в ротор вище $90\text{ }^\circ\text{C}$ енергоефективність системи починає знижуватись, що пов'язано з поглинаючими властивостями силікагелю. Дана особливість впливає з того, що при більш високих температурах, витрати енергії на видалення кожної наступної порції вологи необхідно витратити більшу кількість теплоти, що призводить до зниження загальної ефективності системи. Також не слід забувати і про властивість адсорбційного ротора передавати теплоту між потоками регенераційного та робочого повітря, що в свою чергу також має негативний вплив на загальну енергетичну ефективність роботи стандартної адсорбційної системи. Два, вище вказані фактори у сумі призводять до того, що максимальна ефективність роботи стандартної адсорбційної системи досягається при температурах близько $90\text{ }^\circ\text{C}$.

Дані розрахунків для теплонасосно-адсорбційної системи і того самого ротора товщиною 100 мм наведені в таблицях 5, 6 і на рис. 8.

Таблиця 5 – Залежність параметрів повітря за реального процесу роботи теплонасосно-адсорбційної системи консервування

Температура $t_3, ^\circ C$	Вологовміст $d_2, \text{г/кг.с.п.}$	Температура $t_2, ^\circ C$	Вологовміст $d_4, \text{г/кг.с.п.}$	Температура $t_4, ^\circ C$
50.00	4.71	25.1	13.26	35
55.00	4.41	26.2	14.17	36
60.00	4.1	27.3	15.09	38
65.00	3.8	28.3	16	40
70.00	3.5	29.4	16.91	42
75.00	3.2	30.4	17.81	44
80.00	2.9	31.5	18.69	46
85.00	2.62	32.5	19.52	48
90.00	2.36	33.4	20.32	50
95.00	2.11	34.3	21.05	52
100.00	1.9	35.2	21.71	54

Таблиця 6 – Залежність загального коефіцієнту ефективності роботи теплонасосно-адсорбційної системи від температури зовнішнього повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора ТН при товщині ротора 100 мм

$t_3, ^\circ C$	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	1.248	1.198	1.137	1.060	0.966	0.856	0.728
55	1.288	1.239	1.178	1.101	1.006	0.892	0.765
60	1.301	1.257	1.196	1.120	1.026	0.915	0.784
65	1.297	1.255	1.195	1.121	1.031	0.920	0.789
70	1.283	1.242	1.184	1.115	1.026	0.917	0.787
75	1.265	1.225	1.169	1.101	1.014	0.908	0.781
80	1.240	1.201	1.150	1.084	0.999	0.895	0.769
85	1.210	1.173	1.124	1.059	0.976	0.876	0.754
90	1.181	1.145	1.097	1.033	0.953	0.855	0.736
95	1.145	1.110	1.064	1.003	0.927	0.831	0.713
100	1.107	1.073	1.029	0.970	0.896	0.805	0.690

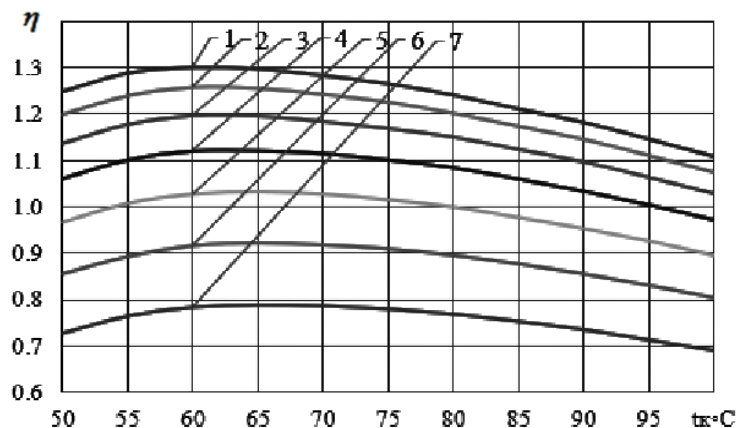


Рисунок 8 - Залежність реального коефіцієнта енергетичної ефективності η теплонасосно-адсорбційної системи від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 100 мм: 1- $t_0=0^\circ C$, 2- $t_0=5^\circ C$, 3- $t_0=10^\circ C$, 4- $t_0=15^\circ C$, 5- $t_0=20^\circ C$, 6- $t_0=25^\circ C$, 7- $t_0=30^\circ C$

З рис. 8 видно, що на відміну від стандартної системи з підвищенням температури навколишнього повітря енергоефективність теплонасосно-адсорбційної системи зменшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні температури свіжого повітря при тій самій відносній вологості збільшується його

вологоміст, наслідком чого є збільшення навантаження на випарник ТН для більш глибокого осушування регенераційного повітря. Крім того видно, що при збільшенні температури регенераційного повітря на вході в ротор до величини 60 - 70⁰С, загальна ефективність системи зростає, а при подальшому підвищенні цієї температури енергоефективність падає, що пояснюється погіршенням умов роботи теплового насосу і відповідним зменшенням його коефіцієнта трансформації.

Результати розрахунків для ротора товщиною 200 мм. Нижче наведені результати аналогічних розрахунків роботи реальних систем при товщині адсорбційного ротора 200 мм. Робота системи при товщині адсорбційного ротора 200 мм буде більшою, ніж при товщині адсорбційного ротора в 100 мм, оскільки більш глибоко буде осушуватись робоче повітря та глибше спрацьовуватись регенераційне повітря.

Результати розрахунків для стандартної системи наведені в таблицях 7, 8, 9 і на рис. 9.

У таблиці 6 наведений вологоміст регенераційного повітря після адсорбційного ротора при використанні стандартної адсорбційної системи за широкого набору параметрів свіжого повітря та температури регенераційного після проходження конденсатора теплонасосної установки, перед подачею в адсорбційний ротор.

Таблиця 7 – Залежність вологомісту регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

t ₃ , °C	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	8.56	8.98	9.53	10.28	11.31	12.72	14.75
55	9.49	9.92	10.49	11.26	12.32	13.77	15.83
60	10.43	10.88	11.46	12.56	13.35	14.82	16.93
65	11.39	11.85	12.45	13.27	14.38	15.89	18.03
70	12.36	12.83	13.45	14.28	15.42	16.95	19.13
75	13.33	13.81	14.44	15.29	16.45	18.01	20.22
80	14.28	14.77	15.41	16.28	17.46	19.05	21.29
85	15.19	15.69	16.34	17.23	18.43	20.05	22.32
90	16.01	16.52	17.19	18.09	19.32	20.97	23.29
95	16.68	17.2	17.88	18.81	20.07	21.76	24.12
100	17.13	17.67	18.37	19.33	20.63	22.36	24.8

В таблиці 7 наведені температури регенераційного повітря для стандартної адсорбційної системи з товщиною ротора 200 мм на виході з адсорбційного ротора, тобто відпрацьованого, насиченого вологою регенераційного повітря, в залежності від параметрів свіжого повітря та температури регенераційного повітря перед подачею в ротор. Температурні рівні регенераційного повітря поступово знижуються при зменшенні температури регенераційного повітря на вході в адсорбційний ротор, а також при зменшенні температури свіжого повітря, яке надходить в калорифер.

Таблиця 8 – Залежність температури регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	29	29	30	31	32	34	36
55	30	31	32	33	34	36	37
60	32	33	34	35	36	37	39
65	34	35	35	36	37	39	41
70	36	37	37	38	39	41	42
75	38	38	39	40	41	42	44
80	40	40	41	42	43	44	46
85	42	42	43	44	45	46	47
90	44	44	45	46	47	48	49
95	46	47	47	48	49	50	51
100	50	50	51	51	52	53	54

Якщо залежність температури відпрацьованого регенераційного повітря від температури регенераційного повітря на вході в ротор є зрозумілою, то її залежність від температури свіжого повітря є не такою прозою. Дана залежність пояснюється тим фактом, що чим нижча температура свіжого повітря, тим нижчим є вологовміст даного повітря, а отже і вологовміст нагрітого регенераційного повітря перед подачею в ротор також є нижчим. Дана особливість призводить до того, що за однакової температури регенераційного повітря з меншим вологовмістом спрацьовується глибше та охолоджується до більш низьких температур і при цьому краще осушує адсорбційний ротор, що в свою чергу краще осушує потік робочого повітря, яким проводять консервування енергетичного обладнання.

В таблиці 9 і на рис. 9 наведені результати розрахунків коефіцієнту енергоефективності стандартної адсорбційної системи.

Таблиця 9 – Залежність реального коефіцієнту енергоефективності стандартної адсорбційної системи консервування від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища при товщині ротора 200 мм

t ₃ , °C	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	0.34439	0.36962	0.39431	0.4178	0.43834	0.45202	0.46397
55	0.35522	0.37942	0.40341	0.42612	0.4467	0.46225	0.47604
60	0.36484	0.38853	0.4114	0.43321	0.45448	0.46991	0.48612
65	0.37391	0.39672	0.41905	0.44092	0.46081	0.47719	0.49369
70	0.3822	0.40421	0.42603	0.44685	0.4666	0.48258	0.49969
75	0.38954	0.4108	0.43173	0.45199	0.47112	0.48715	0.5041
80	0.39548	0.416	0.43609	0.45576	0.47427	0.49023	0.50691
85	0.3997	0.41946	0.4387	0.45776	0.47561	0.49136	0.50767
90	0.40107	0.42001	0.43864	0.45667	0.47409	0.48947	0.50605
95	0.39847	0.41645	0.43402	0.45149	0.4683	0.48343	0.49957
100	0.39071	0.40784	0.42447	0.44118	0.45745	0.47205	0.48889

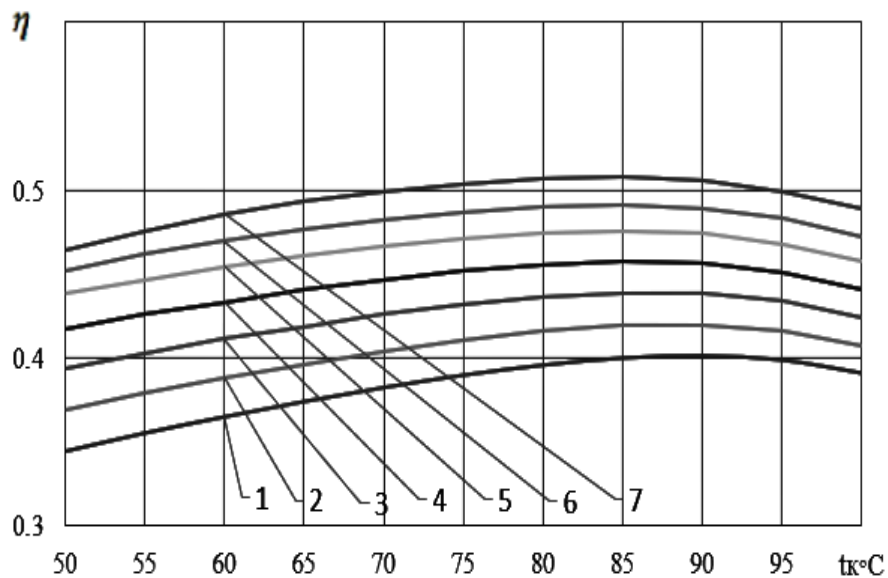


Рисунок 9 - Залежність реального коефіцієнту енергетичної ефективності η стандартної адсорбційної системи від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 200 мм: 1- $t_0=0^\circ\text{C}$, 2- $t_0=5^\circ\text{C}$, 3- $t_0=10^\circ\text{C}$, 4- $t_0=15^\circ\text{C}$, 5- $t_0=20^\circ\text{C}$, 6- $t_0=25^\circ\text{C}$, 7- $t_0=30^\circ\text{C}$

Результати розрахунків для теплонасосно-адсорбційної системи і ротора товщиною 200 мм представлені в таблицях 10,11 і на рис. 10.

Як видно з рисунків 9 і 10, характер впливу основних параметрів (температури регенераційного повітря на вході в ротор і температури зовнішнього повітря) остається таким же, як і для ротора товщиною 100 мм, однак абсолютні значення коефіцієнту енергоефективності суттєво вищі.

Таблиця 10 – Залежність температури та вологовмісту регенераційного повітря після проходження через ротор для теплонасосно-адсорбційної системи від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

$t_3, ^\circ\text{C}$	Параметри регенераційного повітря	
	$d_4, \text{г/кг.с.п.}$	$t_4, ^\circ\text{C}$
50	14.11	35
55	15.18	37
60	16.27	38
65	17.36	40
70	18.45	42
75	19.53	43
80	20.59	45
85	21.61	47
90	22.56	49
95	23.29	51
100	24.03	54

Таблиця 11 – Залежність реального коефіцієнту енергоефективності теплонасосно-адсорбційної системи консервування від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

$t_3, ^\circ\text{C}$	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	1.57386	1.5109	1.4334	1.33691	1.21829	1.0786	0.91764
55	1.60108	1.53959	1.46358	1.36849	1.25087	1.11352	0.95118
60	1.602	1.54837	1.47381	1.38021	1.26393	1.12744	0.96611
65	1.59111	1.53902	1.46644	1.37505	1.26436	1.12893	0.96797
70	1.56868	1.51833	1.44802	1.36341	1.25466	1.12109	0.96274
75	1.54261	1.49372	1.42534	1.34291	1.23667	1.10797	0.95213
80	1.51562	1.46264	1.40113	1.3205	1.21633	1.08979	0.93713
85	1.47797	1.42936	1.36966	1.29127	1.18973	1.06831	0.91869
90	1.43689	1.39241	1.3344	1.25619	1.15913	1.04045	0.89486
95	1.40422	1.36096	1.30449	1.23013	1.13648	1.01935	0.87099
100	1.32657	1.28576	1.23246	1.16216	1.07348	0.96447	0.82712

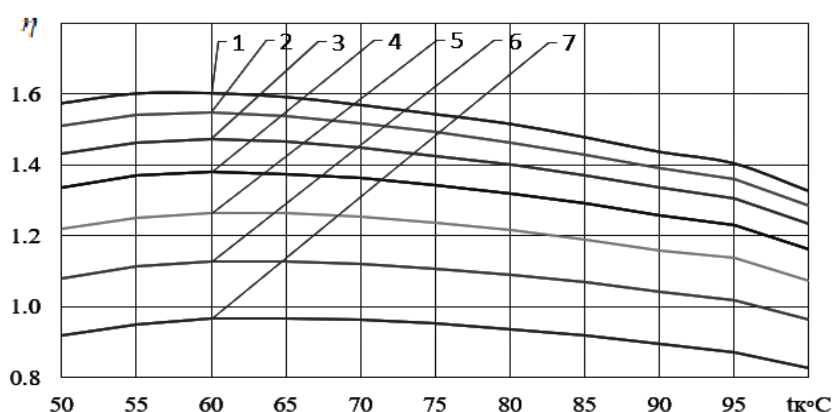


Рисунок 10 - Залежність реального коефіцієнту енергетичної ефективності η теплонасосно-адсорбційної системи від температури регенераційного повітря після конденсатора та температури свіжого повітря, при товщині ротора 200 мм: 1- $t_0=0\text{ }^\circ\text{C}$, 2- $t_0=5\text{ }^\circ\text{C}$, 3- $t_0=10\text{ }^\circ\text{C}$, 4- $t_0=15\text{ }^\circ\text{C}$, 5- $t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$, 6- $t_0=25\text{ }^\circ\text{C}$, 7- $t_0=30\text{ }^\circ\text{C}$

Порівняння енергоефективності базової і удосконаленої систем з теоретичним і реальним ротором. На рисунку 11 наведено загальний графік порівняння максимальних коефіцієнтів ефективності роботи (при оптимальних температурах регенераційного повітря на вході в ротор) для стандартної

адсорбційної системи та удосконаленої теплонасосно-адсорбційної системи за двох товщин ротора- 100 мм та 200 мм. З даного графіка видно, що на ефективність роботи систем суттєво впливають наступні чинники: товщина ротора і параметри свіжого повітря. Видно, що чим більша товщина ротора, тим ефективніше працюють системи як з теплонасосною установкою, так і без неї. Цікавою особливістю роботи систем є той факт, що збільшення температури зовнішнього повітря приводить до підвищення енергоефективності стандартної системи і до зменшення ефективності теплонасосно-адсорбційної системи. Це пояснюється тим, що у стандартній адсорбційній системі при підвищенні початкової температури необхідно витратити менше електричної енергії у калорифері системи, а у випадку теплонасосно-адсорбційної системи супутнє збільшення вологовмісту свіжого повітря приводить до збільшення навантаження на випарник ТН і до відповідного збільшення енергетичних затрат.

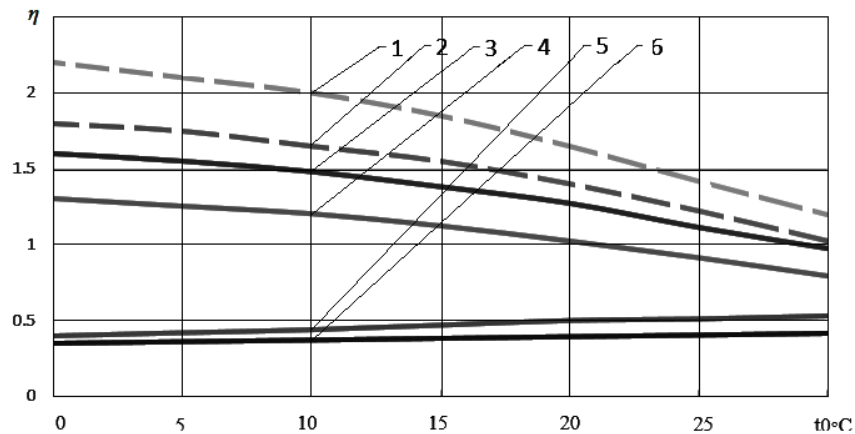


Рисунок 11 - Порівняння енергоефективності роботи теплонасосно-адсорбційної та стандартної адсорбційної системи консервування обладнання в залежності від температури свіжого повітря: 1, 2 – для теоретичної установки при температурі регенераційного повітря 60 °С і 65 °С; 3, 4 – для реальної установки при оптимальній температурі регенераційного повітря і товщині ротора 200 і 100 мм; 5, 6 – для стандартної системи без ТН при товщині ротора 200 мм і 100 мм відповідно

Виходячи із наведеного порівняння на рисунку 11, можна зробити висновок, що використання теплового насосу в системі підготовки регенераційного повітря суттєво покращує загальну енергоефективність роботи реальних систем, однак ефективність дещо нижча, ніж в теоретичних умовах [5], що обумовлено наявністю передачі теплоти від регенераційного повітря до робочого через ротор.

Висновки. З вищенаведених результатів розрахунків видно, що теплонасосно-адсорбційна схема консервування обладнання навіть з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря в адсорбційному роторі є більш ефективною ніж стандартна система з електронагрівачем та дозволяє суттєво економити енергоресурси. Особливостями роботи даної системи є те, що її ефективність зростає при зниженні температури свіжого повітря. Дана обставина обумовлена тим, що при зниженні температури свіжого повітря суттєво зменшується вологовміст повітря, що вимагає не такого глибокого переохолодження рециркуляційного повітря у випарнику, в результаті чого покращуються умови роботи теплового насосу і, як наслідок, підвищується енергетична ефективність роботи теплового насосу.

В результаті числового дослідження показано, що теплонасосно-адсорбційна система характеризується оптимальними значеннями температури регенераційного повітря на рівні 60 – 65 °С, при яких коефіцієнт енергоефективності досягає максимального значення. Також виявлено, що енергетична ефективність стандартної системи на базі електричного нагрівача досягає максимуму при температурі регенераційного повітря 85-90 °С, що свідчить про те, що перегрівати регенеративне повітря вище даних температур небажано, оскільки при більш високих температурах ефективність використання зовнішньої енергії знижується.

В зв'язку зі зменшенням оптимальної температури регенераційного повітря на вході в ротор для теплонасосно-адсорбційної системи в порівнянні з базовою системою слід мати на увазі, що при зменшенні температури регенеративного повітря знижується і поглинаюча потужність обладнання. Дана обставина змушує при використанні теплонасосно-адсорбційної системи збільшувати витрату повітря, яка задіяна в осушенні робочого тракту обладнання.

Список використаної літератури

1. Майстренко О. О. Консервування енергетичного обладнання методом продувки сухим повітрям / Майстренко О. О., Безродний М. К., Шаповал Б. А. // *Енергетика та електрифікація*-2018.- №4 -С. 3–5.
2. Чинні галузеві нормативні документи з експлуатації та ремонту Електростанцій та мереж [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/GID-34.01.101-2009_2018_01_01_web.pdf.
3. Старцев В. И. Методические указания по консервации теплоэнергетического оборудования / Старцев В. И., Кострыкина Е. Ю., Модестова Т. Д. // Москва: СПО ОРГРЭС-1997.
4. Хмельнюк М. Г. Современные технологии осушения воздуха / Хмельнюк М. Г., Ваджинский Д. И., Жихарева Н. В. // *Холодильна техніка та технологія*-2014. - №3- С.15-21.
5. Безродний М.К., Майстренко О.О. Термодинамічний аналіз теплонасосно-адсорбційної схеми консервування енергетичного обладнання // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. - 2019, № 2, с.49 – 58.
6. «Online Calculator» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://calculator.cotes.com>

M. Bezrodny, Dr. Sc. Sciences., Prof. ORCID 0000-0002-3500-5165

O. Maistrenko, Master ORCID 0000-0003-1961-7548

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EFFICIENCY OF HEAT PUMP AND ADSORPTION SYSTEM OF CONSERVATION OF ENERGY EQUIPMENT

The analysis of energy efficiency of heat pump-adsorption system of conservation of power equipment taking into account real processes of dehumidification and humidification of air in adsorption rotor in comparison with energy efficiency of standard system with electric heater of regenerative air is performed. The analysis shows that the heat pump-adsorption system is many times more energy-efficient under the condition of not only theoretical but also real (non-isoenthalpy) working processes in the adsorption rotor. It is also shown that there are optimal values of regeneration air temperature after the heat pump condenser at the inlet to the rotor, at which the energy efficiency of the heat pump-adsorption system reaches maximum values. It is established that the optimal values of regeneration air temperature change in a narrow range (at the level of 60...65 °C), and the maximum values of energy efficiency coefficient significantly decrease for a standard system with electric heater and increase for heat pump-adsorption system with decreasing ambient temperature.

Keywords: protection of metal equipment from corrosion, canning of power equipment, air drainage, adsorption dehumidifier, heat pump.

REFERENCES

1. O.O. Maisrenko, Konservuvannya energetichnoho obladdannya metodon produvki syhum povitryam / O.O. Maisrenko, M.K. Bezrodny, B.A. Shapoval // *Energetika I elektrifikaciya*-2018.-#4.-S.3-5.
2. Chinni haluzevi normativni dokumentu z ekspluatatsii ta remontu Elektrostancii ta merezh [Elektronnyj resurs].- Rezhym dostupu: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/GID-34.01.101-2009_2018_01_01_web.pdf.
3. V.I. Starcev, METODICHESKIE UKAZANIYA PO KONSERVVACII TEPLOENERGETICHESKOHO OBORUDOVANIYA / V.I. Starcev, E.U. Kostrukina, T.D. Modestova // Москва: СПО ОРГРЭС-1997.
4. M.H. Hmelnyuk, Sovremennue tehnologii osusheniya vozduha / M.H. Hmelnyuk, D.I. Vaddzinskiy, N.V. Zihaleva // *Hololilna tehnika ta tehnolohiyz*-2014.-#3.-S.15-21.
5. Bezrodny M.K., Maistrenko O.O. Thermodynamic analysis of heat pump-adsorption scheme of conservation of power equipment // *Energy: economics, technologies, ecology*. - 2019, № 2, p.49 - 58.
6. Web-source «Online Calculator» URL: <http://calculator.cotes.com>

Надійшла 12.11.2020

Received 12.11.2020

ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОБАЛАНСІВ АМІАЧНОГО ЦЕХУ

У статті розглянуто удосконалення методології побудови балансів споживання електроенергії, що ґрунтується на використанні методів отримання більш об'єктивної та обґрунтованої вихідної інформації, зокрема методів збору та оброблення необхідних статистичних даних. Тобто для поліпшення результатів побудови енергобалансів виробничих об'єктів необхідно застосовувати ймовірнісно-статистичні методи. Складання електробалансів виробничих об'єктів із застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу може ґрунтуватися на побудові багатofакторних математичних моделей споживання електричної енергії підприємством в цілому та його підрозділами, на встановленні довірчих інтервалів до цих моделей, на визначенні варіантів можливих обсягів використання електроенергії окремими підрозділами підприємства або на виробництві окремих видів продукції, а також на виявленні найбільш ймовірного варіанта розподілу енергії на об'єкті. Застосовуючи ймовірнісно-статистичний підхід, який пропонується використовувати в умовах невизначеності вихідних даних, можна будувати більш достовірні баланси споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів, ніж за допомогою розрахунково-аналітичного методу. Однак можливість застосування ймовірнісно-статистичного методу побудови електробалансів може виявитися суттєво ускладненою для виробництв, що мають широкий асортимент продукції, та складну, розгалужену схему технологічного процесу, коли у виготовленні окремих видів продукції беруть участь багато підрозділів.

Ключові слова: баланс споживання електричної енергії, ймовірнісно-статистичний метод, довірчі інтервали, розрахунково-аналітичний метод, компресор, аміачний цех.

Вступ

Україна є енергодефіцитною державою, яка імпортує переважну більшість необхідних первинних енергетичних ресурсів, зокрема, природного газу, нафти та нафтопродуктів. Тому раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), тобто практичне вирішення задач енергозбереження в усіх галузях економіки було і залишається для держави актуальною і життєво важливою проблемою.

Є очевидним, що всі види діяльності в сфері енергозбереження фактично являють собою діяльність, спрямовану на підвищення ефективності використання ПЕР, яка має базуватися на об'єктивній кількісній оцінці існуючого рівня енергоефективності, на побудові, аналізі та оптимізації енергетичних потоків, зокрема, і потоків споживання електричної енергії, на визначенні найбільш доцільних заходів і проектів з енергозбереження, на їх впровадженні на різних виробничих, комерційних та комунально-побутових об'єктах.

Відомо, що основним (а краще сказати – єдиним) методом планування та аналізу споживання і ефективності використання палива та енергії всіх видів є побудова та аналіз відповідних енергетичних балансів, які відображають кількісну відповідність між надходженням і використанням тих чи інших енергоресурсів [1]. При цьому необхідно зазначити, що єдиної, універсальної методики складання та аналізу фактичних енергобалансів для різних об'єктів, а також на різних рівнях управління економікою на сьогоднішній день практично не існує. Особливо складними задачами є побудова та аналіз енергобалансів окремих агрегатів, установок чи виробничих процесів. Причому найбільші труднощі виникають при побудові та аналізі балансів споживання електричної енергії, структура витратної частини яких, на відміну від балансів споживання палива чи, наприклад, теплової енергії, є значно більш складною і динамічною (протягом короткого часу можуть відбуватися суттєві зміни як складу, так і числових значень статей витратної частини балансу).

Тому, особливо при побудові та аналізі балансів споживання електроенергії на виробничих об'єктах, де, як правило, відбуваються швидкі зміни складу працюючого обладнання, його режимів роботи та завантаження за продуктивністю, а також численних технологічних параметрів, важливо не просто застосовувати чітку і об'єктивну методику побудови електробалансів, але й мати можливість вирішувати цю задачу достатньо оперативно (наприклад, щодобово або, навіть, щогодинно).

Теоретично для побудови електробалансів будь-яких технологічних чи виробничо-господарських об'єктів можуть бути застосовані експериментальний, розрахунково-аналітичний або комбінований методи, останній з яких являє собою поєднання двох попередніх [2, 3].

Найбільш достовірна та оперативна інформація для побудови електробалансів виробничих об'єктів (машин, установок, агрегатів, окремих технологічних процесів, підприємств, їх підрозділів тощо) може бути отримана за допомогою приладів обліку, тобто експериментальним шляхом. Однак застосування цього методу для складення фактичних балансів споживання електричної енергії на переважній більшості діючих в Україні підприємств є просто неможливим, оскільки при його використанні мова йде про необхідність проведення синхронізованих у часі вимірювань у багатьох десятках чи навіть сотнях пунктів. Тому про використання експериментального методу для побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів мова може йти лише у тому випадку, якщо підприємство, організація чи установа має розгалужену систему технічного обліку електроспоживання, зокрема відповідну автоматизовану систему обліку. Проте на сьогоднішній день переважна більшість подібних об'єктів в Україні таких систем обліку не має.

Найбільш реальним для побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів традиційно вважається комбінований метод. Однак практичне застосування цього методу також є суттєво обмеженим, зокрема, через неможливість отримання з зазначених вище причин необхідних експериментальних даних.

Таким чином, для побудови балансів споживання електричної енергії для різних виробничо-господарських об'єктів зараз фактично використовується лише один метод - розрахунково-аналітичний. При застосуванні цього методу кількісна величина корисних витрат та втрат енергії за кожною статтею витратної частини електробалансу мають визначатись на підставі відповідних фізико-хімічних або емпіричних залежностей, які можуть бути знайдені у відповідній довідковій літературі. Однак для значної кількості діючих технологічних об'єктів (машин, установок, агрегатів чи окремих технологічних процесів) необхідні емпіричні залежності виявляються відсутніми або непридатними для нових типів обладнання, оскільки наявна в Україні довідкова література видавалася ще за радянських часів, а потрібних фізико-хімічних залежностей може не бути взагалі. До того ж, необхідно зазначити, що навіть наявні і придатні до використання фізико-хімічні або емпіричні залежності, здебільшого, практично не можуть бути застосовані для побудови електробалансів, оскільки на переважній кількості виробничих об'єктів не здійснюється облік чи моніторинг числових значень показників, які необхідно використовувати у зазначених формулах для виконання відповідних розрахунків (тобто, числові значення цих показників є невідомими).

З зазначених причин при використанні для побудови електробалансів розрахунково-аналітичного методу обсяги споживання електричної енергії для більшості установок чи агрегатів на практиці визначаються за спрощеною розрахунковою формулою [3]:

$$W = P_{\text{вст}} \cdot k_{\text{вик}} \cdot t, \quad (1)$$

де $P_{\text{вст}}$ – встановлена потужність електродвигуна (чи іншого електроприймача) виробничого обладнання, кВт; t – тривалість його роботи протягом відповідного періоду, год.; $k_{\text{вик}}$ – середній коефіцієнт використання встановленої потужності електродвигуна такого обладнання.

Якщо встановлену потужність електроприймачів виробничого обладнання можна вважати відомою, то тривалість його роботи, здебільшого, є невідомою. Виключенням може бути тільки основне обладнання, тривалість роботи якого визначається відповідними технологічними картами або регламентами. Що ж стосується коефіцієнтів використання встановленої потужності і тривалості роботи переважної більшості виробничого та допоміжного обладнання, що використовуються в наведеній вище спрощеній формулі (1), то вони, як правило, являють собою невизначені параметри, числові значення яких необґрунтовані жодними експериментальними вимірюваннями, розрахунками або технологічною документацією.

Тому при побудові електробалансів виробничо-господарських об'єктів спрощеним розрахунково-аналітичним методом застосовують середньостатистичні значення коефіцієнтів використання встановленої потужності електроприймачів, наведені у довідковій літературі для відповідних типів обладнання (наприклад, у [4]). Ці коефіцієнти не тільки є середньостатистичними величинами і, здебільшого, не відповідають конкретним виробничим умовам того чи іншого підприємства, але, до того ж, наводяться в довідниках для кожного типу обладнання у вигляді досить широкого інтервалу можливих їх числових значень. При цьому вибір конкретних числових значень довідкових коефіцієнтів використання встановленої потужності з діапазону їх можливих величин (наприклад, мінімальних або максимальних) фактично є довільним, хоча дуже помітно впливає на розрахунковий обсяг споживання електроенергії відповідним обладнанням.

Таким чином, можна стверджувати, що внаслідок застосування недостовірних значень коефіцієнтів використання встановленої потужності установок чи агрегатів а також тривалості їх роботи розрахункові величини обсягів споживання електричної енергії, що визначаються спрощеним розрахунково-аналітичним методом, можуть суттєво відрізнятись від фактичних обсягів електроспоживання відповідного обладнання протягом певного періоду. Однак при цьому загальне (сумарне) розрахункове споживання електроенергії на виробничо-господарському об'єкті, для якого складається енергобаланс, може досить точно співпадати з фактичним обсягом споживання електричної енергії на цьому об'єкті, зареєстрованим приладами обліку.

Такий збіг розрахункових і фактичних сумарних витрат електричної енергії на тому чи іншому виробничо-господарському об'єкті зазвичай сприймається як ознака достатньої точності побудованого для нього електробалансу. Проте, виходячи з зазначеного вище, необхідно розуміти, що оцінки обсягів споживання електроенергії за окремими статтями електробалансів, одержаних спрощеним розрахунково-аналітичним шляхом, здебільшого, виявляються спотвореними і значною мірою не відповідають реальним витратам електричної енергії окремими установками чи агрегатами.

Отже можна сказати, що баланси споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів, що складаються з використанням спрощеного розрахунково-аналітичного методу, фактично будуються в умовах невизначеності та неповноти вихідних даних. Зважаючи на це, електричні баланси, побудовані із застосуванням цього методу, здебільшого, не можна вважати достатньо достовірними та обґрунтованими [5].

Приймаючи до уваги надзвичайно важливу роль балансів споживання електричної енергії для успішного вирішення задач управління ефективністю її використання, зокрема на виробничо-господарських об'єктах, цілком очевидним є, що в існуючих умовах удосконалення і подальший розвиток методів побудови балансів споживання електричної енергії на господарських об'єктах є задачею важливою і актуальною.

Оскільки електроспоживання виробничих об'єктів значною мірою має випадковий характер, а їх електробаланси складаються в умовах невизначеності та неповноти вихідних даних, одним з найбільш доцільних та перспективних напрямів удосконалення методології побудови балансів споживання електроенергії слід вважати застосування ймовірно-статистичного підходу [5, 6].

Застосування в зазначених умовах відповідних методів теорії ймовірності та математичної статистики, на відміну від розрахунково-аналітичних методів, здатне забезпечити побудову значно більш достовірних та обґрунтованих електробалансів, що, у свою чергу, дасть змогу здійснювати об'єктивний контроль та аналіз ефективності використання електроенергії у суспільному виробництві.

Пропозиції і цілі

Метою цієї статті є продемонструвати на реальних прикладах можливість та доцільність застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів виробничих об'єктів в умовах неповноти та невизначеності вихідних даних.

Матеріали та результати дослідження

Для досягнення зазначеної мети було проведено експеримент, в ході якого з використанням спрощеного розрахунково-аналітичного і ймовірно-статистичного методів здійснювалась побудова фактичних добових балансів споживання електричної енергії у одному з підрозділів хімічного підприємства, а саме, у цеху з виробництва аміаку.

Вибір саме цього підрозділу для проведення експерименту зумовлений тим, що даний цех з точки зору побудови електробалансів являє собою дуже простий об'єкт, для якого досить успішно може бути застосовано навіть спрощений розрахунково-аналітичний метод. Основним електрообладнанням цеху є п'ять однотипних аміачних компресорів, які, здебільшого, працюють з постійним навантаженням, мають однакову встановлену потужність електродвигунів (6780 кВт) і живляться електричною енергією від цехової трансформаторної підстанції за радіальною схемою фідерами, які умовно позначено номерами 3Г, 28Г, 4Г, 3В і 4В.

Цей об'єкт було вибрано ще й з тієї причини, що даний цех оснащено автоматизованою системою обліку споживання електричної енергії, яка охоплює, зокрема, і всі аміачні компресори. Ця обставина дозволила в ході експерименту порівнювати результати побудови електробалансів різними методами не тільки між собою, але й з фактичними даними обліку електроспоживання.

Автоматизована система обліку споживання електричної енергії щодоби дозволяє отримувати дані про фактичні щогодинні обсяги використання енергії окремо кожним з аміачних компресорів а також всією їх групою. Очевидним є, що ці дані являють собою фактичні електробаланси (годинні і добові) даної групи компресорів.

У таблиці 1 наведено зазначені дані про фактичні обсяги електроспоживання групи аміачних компресорів цеху за певну добу, яка має умовний номер 1. На прикладі цієї доби далі буде

продемонстровано процес та результати побудови балансу споживання електричної енергії даної групи компресорів.

Крім фактичних обсягів споживання електроенергії, за даними, одержаними з автоматизованої системи обліку електроспоживання, можна визначити тривалість роботи кожного з аміачних компресорів протягом відповідної доби. Наприклад, для доби № 1 (табл. 1) тривалість роботи компресорів номер 1, 2, 3 і 5 складала 19 годин. Компресор номер 4 протягом цієї доби взагалі не працював.

Таблиця 1 – Фактичні дані про споживання електричної енергії (кВт·год.) в цеху з виробництва аміаку протягом доби з умовним номером 1

Година доби	Компресор 1 (Фідер 3Г)	Компресор 2 (Фідер 28Г)	Компресор 3 (Фідер 4Г)	Компресор 4 (Фідер 3В)	Компресор 5 (Фідер 4В)
0 – 1	5 496,00	5 130,44	5 191,00	0,00	5 515,00
1 – 2	5 481,63	5 121,63	5 180,00	0,00	5 503,00
2 – 3	5 480,00	5 132,00	5 185,00	0,00	5 507,00
3 – 4	5 487,25	5 132,00	5 193,00	0,00	5 508,00
4 – 5	5 494,44	5 153,63	5 208,00	0,00	5 525,00
5 – 6	5 565,63	5 216,06	5 291,00	0,00	5 596,00
6 – 7	5 525,63	5 179,25	5 246,00	0,00	5 547,00
7 – 8	5 536,06	5 200,00	5 254,00	0,00	5 561,00
8 – 9	5 545,63	5 192,00	5 243,00	0,00	5 552,00
9 – 10	5 520,81	5 170,44	5 221,00	0,00	5 536,00
10 – 11	5 500,00	5 143,25	5 202,00	0,00	5 518,00
11 – 12	5 488,81	5 135,25	5 185,00	0,00	5 505,00
12 – 13	5 504,81	5 134,38	5 182,00	0,00	5 528,00
13 – 14	5 488,00	5 116,88	5 173,00	0,00	5 507,00
14 – 15	5 483,25	5 106,44	5 163,00	0,00	5 506,00
15 – 16	5 491,25	5 093,63	5 148,00	0,00	5 510,00
16 – 17	5 479,25	5 078,44	5 134,00	0,00	5 503,00
17 – 18	5 484,00	5 087,19	5 139,00	0,00	5 503,00
18 – 19	5 493,63	5 094,44	5 144,00	0,00	5 520,00
19 – 20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20 – 21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21 – 22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22 – 23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23 – 24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Проведений експеримент полягав у тому, що фактичні щогодинні обсяги споживання електричної енергії протягом тієї чи іншої доби окремо кожним компресором вважалися невідомими. Однак при цьому було прийнято, що за даними обліку для відповідної доби є відомими сумарні обсяги електроспоживання всієї групи аміачних компресорів, що розглядається.

Побудова електробалансів групи компресорів спрощеним розрахунково-аналітичним методом.

Для побудови фактичних балансів споживання електроенергії (годинних чи добових) традиційно використовують спрощений розрахунково-аналітичний метод. Як було зазначено вище, згідно цього методу обсяг споживання електричної енергії окремо кожним компресором (W) протягом того чи іншого періоду визначається розрахунковим шляхом за спрощеною формулою (1).

Виходячи з наведених вище умов даного експерименту єдиною невідомою величиною у формулі (1) є коефіцієнт використання встановленої потужності електродвигуна компресора. Точніше, ця величина є нечітко визначеною, оскільки її, здебільшого, приймають на підставі відповідних довідкових матеріалів, де такі коефіцієнти наводяться у вигляді певних інтервалів можливих їх числових значень. Наприклад, згідно [4] середні числові значення коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів подібних компресорів можуть знаходитись в інтервалі 0,6 – 0,8. Не маючи даних про фактичні величини цих коефіцієнтів для реальних компресорів, що розглядаються, логічним є для розрахунку використовувати їх середнє довідкове значення (0,7). Виконавши відповідні розрахунки за формулою (1) для всіх аміачних компресорів, отримаємо розрахунковий баланс споживання електричної енергії групою цих компресорів, зокрема, для доби з умовним номером 1 (табл. 2).

На підставі результатів, наведених в таблиці 2, вже можна зробити певні висновки стосовно можливості та доцільності застосування спрощеного розрахунково-аналітичного методу побудови електробалансів в умовах недостатніх та нечітко заданих вихідних даних.

Відносна похибка визначення сумарного обсягу споживання електричної енергії всією групою аміачних компресорів, що дорівнює 11,1%, є дещо зavelикою, але може вважатися прийнятною. Тим більше, що похибка розрахунку аналогічних показників, визначених в ході цього експерименту з використанням спрощеного розрахунково-аналітичного методу для низки інших діб, також не перевищувала 10%.

Таблиця 2 – Результат порівняння розрахункового електробалансу групи аміачних компресорів з їх фактичним балансом споживання електроенергії, одержаним за даними обліку електроспоживання для доби з умовним номером 1

Компресор	№1 (Фідер 3Г)	№ 2 (Фідер 28Г)	№ 3 (Фідер 4Г)	№ 4 (Фідер 3В)	№ 5 (Фідер 4В)	Група компресорів разом
$W_{\text{факт.}}$	104546,06	97617,31	98682,00	0	104950,00	405795,38
$W_{\text{розр.}}$	90174	90174	90174	0	90174	360696
Відносна похибка δ	-0,1374711	-0,0762499	-0,0862163	0	-0,1407909	-0,1111382

Таким чином за результатами даного експерименту виявилось, що в зазначених вище умовах застосування спрощеного аналітичного методу для розрахунку сумарного обсягу електроспоживання групи аміачних компресорів (тобто, числового значення прибуткової частини відповідних добових електробалансів) є можливим.

Однак, що стосується числових величин статей витратної частини таких електробалансів (тобто, обсягів електроспоживання окремих компресорів), то використання для їх визначення спрощеного розрахунково-аналітичного методу вважати доцільним неможна, оскільки відносні похибки розрахунку цих величин для різних діб в ході виконання експериментальних розрахунків коливалися в широких межах: від 1,5 до 52 і, навіть, до 89%.

Крім того, слід звернути увагу на той факт, що, використовуючи зазначений спрощений метод, практично неможливо будувати годинні електробаланси. Це легко помітити, зокрема, на прикладі групи аміачних компресорів, що розглядається: числові значення статей витратної частини таких балансів, визначені спрощеним розрахунково-аналітичним шляхом, залишатимуться однаковими для будь-якої години доби, у той час, як фактичні величини коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів кожного з компресорів щогодини можуть змінюватись в досить широких межах (пропорційно рівню завантаження компресорів за продуктивністю).

Більш того, розрахункові обсяги годинного споживання електроенергії окремими компресорами, визначені з застосуванням такого спрощеного методу, часто взагалі не являтимуть собою числові значення статей відповідних годинних балансів електроспоживання, оскільки сума цих розрахункових значень буде суттєво відрізнятися від фактичного загального обсягу споживання електричної енергії всією групою компресорів, визначеного за даними обліку.

Таким чином одержані результати підтверджують, що, навіть у достатньо сприятливих умовах, в яких проводився даний експеримент, застосування спрощеного розрахунково-аналітичного методу для побудови балансів споживання електроенергії далеко не завжди є доцільним, а досить часто є взагалі неможливим, оскільки оцінки обсягів споживання електроенергії за окремими статтями електробалансів, одержані з використанням цього методу, здебільшого виявляються спотвореними і значною мірою не відповідають реальним витратам електричної енергії окремими установками чи агрегатами.

Побудова електробалансів групи компресорів ймовірно-статистичним способом.

Ідея використання для побудови балансів споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів ймовірно-статистичних методів ґрунтується на тому, що традиційний розрахунково-аналітичний метод не враховує випадкового характеру як невідомих обсягів електроспоживання, так і необхідних для побудови балансів вихідних даних, частина яких часто є просто відсутньою, а частина являє собою нечітко визначені показники. Цілком очевидним є, що для одержання достатньо обґрунтованих та достовірних електробалансів виробничо-господарських об'єктів в зазначених умовах доцільно застосовувати саме методи теорії ймовірності та математичної статистики [7, 8].

Обсяги споживання електричної енергії кожним з аміачних компресорів, необхідні для складення електробалансів їх групи, є величинами, на які впливають численні чинники, зокрема, кількість виробленої

продукції, технічний стан та режими роботи обладнання, параметри технологічного процесу тощо. Однак в умовах нашого експерименту числові значення таких чинників є невідомими. Тому зазначені обсяги електроспоживання окремих компресорів необхідно розглядати як випадкові величини, які теоретично можуть приймати будь-які значення.

Проте, застосовуючи ймовірно-статистичний підхід до побудови електробалансів, можна визначити деякі максимальні й мінімальні значення цих випадкових величин, в межах яких з певною ймовірністю будуть знаходитись дійсні, реальні обсяги споживання електричної енергії кожним з аміачних компресорів, що розглядаються [5, 8]. Наприклад, такі мінімальні і максимальні значення електроспоживання для будь-якого (i -го) компресора можна визначити, маючи статистичні дані про фактичні обсяги споживання електроенергії кожним з компресорів за попередні періоди і знаючи закон розподілу відповідних випадкових величин:

$$W_{\max i} = M_{W_i} + t_{1-\alpha} \sigma_{W_i}; \quad W_{\min i} = M_{W_i} - t_{1-\alpha} \sigma_{W_i}, \quad (2)$$

де M_{W_i} – математичне сподівання обсягу споживання електроенергії i -го компресора, що визначається за наявною вибіркою фактичних обсягів його електроспоживання; σ_{W_i} – середньоквадратичне відхилення фактичних величин електроспоживання від їх середнього значення (визначається за тією ж вибіркою фактичних обсягів електроспоживання); $t_{1-\alpha}$ – квантиль порядку $1-\alpha$ для стандартизованого Гаусового розподілу (якщо дана випадкова величина має нормальний закон розподілу).

При цьому можна стверджувати, що з певною ймовірністю α фактичний обсяг електроспоживання i -го компресора за будь-який попередній період (наприклад, добу) знаходиться в інтервалі:

$$W_{\min i} < W_i < W_{\max i}. \quad (3)$$

Але, щоб скористатися формулами (2) для визначення можливої мінімальної і максимальної величини обсягу споживання електроенергії будь-яким (i -м) компресором, треба мати статистичні (звітні) дані про фактичні обсяги його електроспоживання за попередні періоди а також знати закон розподілу відповідної випадкової величини.

За умовами даного експерименту таких даних ми не маємо. У такій ситуації для знаходження величин $W_{\max i}$ та $W_{\min i}$ можна спробувати скористатися досвідом та знаннями спеціалістів-експертів підприємства (операторів, енергетиків, менеджерів) і відповідними методами експертного опитування [9]. Проте навряд чи фахівці підприємства мають уявлення про інтервали можливих значень обсягів електроспоживання конкретних компресорів, якщо облік цих величин на підприємстві не здійснюється (а саме це передбачено умовами даного експерименту).

З іншого боку, як було показано вище, невідомі обсяги споживання електричної енергії кожним з аміачних компресорів (зокрема, $W_{\max i}$ та $W_{\min i}$) можна визначити розрахунковим шляхом, скориставшись спрощеною формулою (1), у якій за умовами експерименту єдиним нечітко визначеними показниками є коефіцієнти використання встановленої потужності електродвигунів компресорів ($k_{\text{вик.}i}$). При цьому фахівці підприємства можуть мати значно краще уявлення про діапазони можливих числових значень цих коефіцієнтів, ніж про невідомі обсяги електроспоживання компресорів.

Отже діапазони можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності для кожного з компресорів, що розглядаються, можна визначити, використовуючи методи експертного опитування, зі значно більшою достовірністю, ніж безпосередньо інтервали можливих обсягів їх електроспоживання. У крайньому випадку для встановлення діапазонів можливих значень цих коефіцієнтів, як і при застосуванні спрощеного розрахунково-аналітичного методу, можна скористатися відповідними довідковими даними [4] або, навіть, прийняти, що ці коефіцієнти знаходяться в інтервалі від 0 до 1. Це суттєво не вплине на точність побудови електробалансів, а тільки може дещо збільшити розмірність і тривалість вирішення відповідної задачі.

Зокрема, в даному експерименті за результатами опитування спеціалістів-експертів аміачного цеху було визначено, що фактичні значення коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів кожного з компресорів з найбільшою ймовірністю знаходяться в межах 0,65 – 0,85.

Застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови балансів споживання електричної енергії базується на тому, що в межах встановлених довірчих інтервалів (3), для визначення достовірних обсягів споживання електроенергії кожним з аміачних компресорів, що розглядаються, необхідно згенерувати серію можливих варіантів (альтернатив) величини їх електроспоживання.

Однак, враховуючи сказане вище, генерувати слід альтернативи можливих числових значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів кожного з компресорів ($k_{\text{вик.}i}$), а відповідні їм альтернативи можливих обсягів споживання електричної енергії цими компресорами (W_i) потрібно визначати розрахунковим шляхом, використовуючи спрощену залежність (1). Тобто, цей процес полягає у послідовному формуванні двох відповідних матриць, число рядків яких дорівнює кількості згенерованих альтернатив, а число стовпців – кількості статей витратної частини електробалансу (тобто, кількості споживачів електроенергії, які мають бути враховані у цьому балансі).

Фрагмент прикладу одного з результатів генерування можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності п'яти аміачних компресорів, що розглядаються в цьому експерименті, наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Частина згенерованих можливих значень (альтернатив) коефіцієнтів використання встановленої потужності для п'яти аміачних компресорів

Умовні номери альтернатив значень $k_{\text{вик.}i}$	Компресор 1 (Фідер 3Г)	Компресор 2 (Фідер 28Г)	Компресор 3 (Фідер 4Г)	Компресор 4 (Фідер 3В)	Компресор 5 (Фідер 4В)
1	0,79	0,66	0,82	0,84	0,74
2	0,84	0,78	0,78	0,76	0,79
3	0,68	0,84	0,78	0,73	0,75
4	0,72	0,81	0,76	0,68	0,70
5	0,68	0,67	0,73	0,78	0,78
.....

Кожен з стовпців таблиці 3 являє собою деяку вибірку можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів аміачних компресорів, що розглядаються. При цьому, якщо є відомими статистичні характеристики цих вибірок (математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення числових значень елементів вибірки від їх середньої величини), а також закон розподілу відповідної випадкової величини, то можна визначити ймовірність появи кожної з альтернатив значень коефіцієнтів використання встановленої потужності компресорів.

Найпростіше визначати такі ймовірності, якщо закон розподілу цієї випадкової величини для кожного з компресорів є нормальним. Забезпечити виконання цієї умови можна вже в процесі генерування можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів компресорів. Для цього, по-перше, необхідно генерувати достатньо великі вибірки значень цих коефіцієнтів. Зокрема, в ході даного експерименту при побудові кожного з електробалансів групи аміачних компресорів, що розглядаються, для кожного з них генерувалися вибірки можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності, що містили по 10 000 елементів. По-друге, кожна числова величина коефіцієнтів використання встановленої потужності, що була включена до цих вибірок, вибиралася випадковим способом з наведеного вище діапазону їх можливих значень (0,65 – 0,85).

Далі загальний діапазон можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів, визначений для кожного з компресорів, необхідно поділити на певну кількість інтервалів. При цьому ймовірність p появи будь-якого (i -го) числового значення коефіцієнту використання встановленої потужності ($k_{\text{вик.}i}$), яке знаходиться у тому чи іншому з цих інтервалів, визначається за формулою:

$$p(k_{\text{вик.}i}) = 0,5(F(t)_{\text{верхн.}} - F(t)_{\text{нижн.}}), \quad (4)$$

де $F(t)_{\text{верхн.}}$ і $F(t)_{\text{нижн.}}$ – числові значення інтеграла Лапласа [7, 8] для верхньої та нижньої межі інтервалу, у якому знаходиться відповідне альтернативне значення коефіцієнту використання встановленої потужності компресора.

Для кожного з п'яти аміачних компресорів, що розглядалися в ході цього експерименту, загальний діапазон можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності їх електродвигунів було прийнято однаковим. Цей діапазон для кожного з компресорів було поділено на чотири інтервали (0,65 –

0,7; 0,7 – 0,75; 0,75 – 0,8 і 0,8 – 0,85). Після чого з використанням формули (4) була визначена ймовірність знаходження можливих значень (альтернатив) коефіцієнтів використання встановленої потужності у кожному з зазначених інтервалів. При цьому, не дивлячись на те, що межі інтервалів можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності для всіх компресорів були прийняті однаковими, ймовірність знаходження цих коефіцієнтів у відповідних інтервалах для різних компресорів є різною, оскільки різними є статистичні характеристики згенерованих вибірок коефіцієнтів використання (стовпці табл. 3). Наприклад, величини зазначеної ймовірності для компресорів № 1 та № 3 наведено в таблицях 4 і 5 відповідно.

Таблиця 4 – Ймовірності знаходження у визначених інтервалах можливих значень коефіцієнту використання встановленої потужності для компресора № 1

$k_{\text{вик.}}$	Нормоване значення (t) $k_{\text{вик.}}$	$F(t)$	Ймовірність знаходження в інтервалі
0,65	1,65	-0,90106	0,1624
0,70	0,80	-0,57629	
0,70	0,80	-0,57629	0,3121
0,75	0,06	0,04784	
0,75	0,06	0,04784	0,2973
0,80	0,92	0,64243	
0,80	0,92	0,64243	0,1412
0,85	1,78	0,92492	

Таблиця 5 – Ймовірності знаходження у визначених інтервалах можливих значень коефіцієнту використання встановленої потужності для компресора № 3

$k_{\text{вик.}}$	Нормоване значення (t) $k_{\text{вик.}}$	$F(t)$	Ймовірність знаходження в інтервалі
0,65	1,75	-0,91988	0,1361
0,70	0,93	-0,64763	
0,70	0,93	-0,64763	0,2840
0,75	0,10	-0,07966	
0,75	0,10	-0,07966	0,3041
0,80	0,72	0,52848	
0,80	0,72	0,52848	0,1740
0,85	1,54	0,87644	

Як зазначалося раніше, можливі числові значення (альтернативи) обсягів споживання електричної енергії, які відповідають згенерованим можливим величинам коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів компресорів (зокрема, наведеним у табл. 3), було визначено розрахунковим шляхом з використанням спрощеної формули (1). Фрагмент прикладу одного з результатів розрахунку можливих значень (альтернатив) обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів, що розглядаються в цьому експерименті, наведено в таблиці 6.

Так як у формулі (1) за умовами даного експерименту присутня лише одна випадкова (нечітко задана) величина - коефіцієнти використання встановленої потужності електродвигунів компресорів, для подальших розрахунків можна прийняти, що числові величини ймовірності появи визначених розрахунковим шляхом можливих значень (альтернатив) обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів (табл. 6) є такими ж, як і ймовірності появи відповідних їм можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності (табл. 4 і 5).

Беручи до уваги, що загальне споживання електричної енергії всією групою компресорів, що розглядається, це сума обсягів її споживання окремо кожним компресором, та комбінуючи випадковим чином різні альтернативи обсягів їх електроспоживання (табл. 6), можна отримати множину рівнянь,

кожне з яких являє собою один з можливих варіантів балансу споживання електроенергії цією групою компресорів:

$$\begin{aligned} W_{11} + W_{21} + \dots + W_{n1} &= W_{1\Sigma}^p, \\ W_{12} + W_{22} + \dots + W_{n2} &= W_{2\Sigma}^p, \\ W_{13} + W_{23} + \dots + W_{n3} &= W_{3\Sigma}^p, \\ &\dots \\ W_{1m} + W_{2m} + \dots + W_{nm} &= W_{m\Sigma}^p, \end{aligned} \quad (5)$$

де W_{ij} – можливий обсяг споживання електроенергії j -м компресором, який являє собою певну (i -ту) альтернативу величини його електроспоживання; $W_{j\Sigma}^p$ – розрахунковий обсяг споживання електроенергії всією групою компресорів (j -й можливий варіант загального обсягу електроспоживання даної групи компресорів).

Таблиця 6 – Частина розрахованих можливих значень (альтернатив) обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів

Умовні номери альтернатив значень W_i	Компресор 1 (Фідер 3Г)	Компресор 2 (Фідер 28Г)	Компресор 3 (Фідер 4Г)	Компресор 4 (Фідер 3В)	Компресор 5 (Фідер 4В)
1	101767,8	85021,2	105632,4	0	95326,8
2	108208,8	100479,6	100479,6	0	101767,8
3	87597,6	108208,8	100479,6	0	96615
4	92750,4	104344,2	97903,2	0	90174
5	87597,6	86309,4	94038,6	0	100479,6
.....

Якщо загальна кількість комбінацій альтернатив обсягів споживання електроенергії окремими компресорами є достатньо великою, то можна стверджувати, що серед всієї множини рівнянь (5) обов'язково присутнє таке рівняння, яке точно відображає фактичний електробаланс цієї групи компресорів, який дійсно мав місце протягом відповідного періоду (наприклад, доби).

Однак певна кількість отриманих таким чином варіантів загального електроспоживання групи компресорів (5) є абсолютно недостовірними (неможливими), оскільки для них виконується нерівність:

$$\frac{|W_{j\Sigma}^p - W_{j\Sigma}^\phi|}{W_{j\Sigma}^\phi} \cdot 100 \geq \Delta, \quad (6)$$

де $W_{j\Sigma}^\phi$ – фактичний загальний обсяг споживання електроенергії групою компресорів протягом відповідного періоду, визначений за приладами обліку електроспоживання; Δ – заздалегідь встановлене припустиме відхилення розрахункового значення загального обсягу споживання електричної енергії (j -го можливого варіанту загального обсягу електроспоживання) цією групою компресорів від його фактичної величини.

Такі, недостовірні варіанти балансу споживання електроенергії даною групою компресорів слід виключити з подальшого розгляду.

Приклад комбінування можливих обсягів (альтернатив) споживання електричної енергії для групи аміачних компресорів, що розглядаються в цьому експерименті, наведено в таблиці 7.

Фактичний загальний обсяг споживання електричної енергії всією групою аміачних компресорів, що розглядається, протягом доби з умовним номером 1, визначений за даними системи обліку електроспоживання, склав 405795,38 кВт·год. Таким чином, якщо припустиме відхилення розрахункового значення загального обсягу споживання електричної енергії (j -го можливого варіанту загального обсягу електроспоживання) цією групою компресорів від його фактичної величини не повинно перевищувати, наприклад, 5%, то варіанти балансу споживання електроенергії даною групою компресорів з умовними номерами 4 і 5 (табл. 7), які мають величину зазначеного відхилення відповідно 5,1% і 9,2%, слід вважати недостовірними і виключити з подальшого розгляду.

Для тих можливих розрахункових значень загального споживання електроенергії всією групою аміачних компресорів, які несуттєво відрізняються від фактичної величини їх електроспоживання (нерівність (6) не виконується), необхідно визначити ймовірність появи відповідної комбінації альтернатив обсягів споживання електричної енергії кожним з компресорів (тобто, ймовірність появи відповідного варіанту балансу споживання електроенергії цією групою компресорів).

Таблиця 7 – Окремі можливі комбінації випадкових значень (альтернатив) коефіцієнтів використання встановленої потужності та відповідних їм розрахункових обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів

Умовні номери альтернатив значень W_i	Компресор 1 (Фідер 3Г)		Компресор 2 (Фідер 28Г)		Компресор 3 (Фідер 4Г)		Компресор 4 (Фідер 3В)		Компресор 5 (Фідер 4В)		Група компресорів разом W_{Σ}
	$k_{\text{вик}}$	W	$k_{\text{вик}}$	W	$k_{\text{вик}}$	W	$k_{\text{вик}}$	W	$k_{\text{вик}}$	W	
1	0,79	101768	0,66	85021	0,82	105632	0,84	0	0,74	95327	387748
2	0,84	108209	0,78	100480	0,78	100480	0,76	0	0,79	101768	410936
3	0,68	87598	0,84	108209	0,78	100480	0,73	0	0,75	96615	392901
4	0,72	92750	0,81	104344	0,76	97903	0,68	0	0,7	90174	385172
5	0,68	87598	0,67	86309	0,73	94039	0,78	0	0,78	100480	368425
.....

Оскільки комбінування можливих альтернатив обсягу споживання електричної енергії окремими компресорами при формуванні варіантів електробалансу їх групи здійснювалось випадковим чином, поява кожної альтернативи електроспоживання компресорів є незалежними подіями. Отже суміщена ймовірність виникнення того чи іншого результату такого комбінування (тобто, того чи іншого варіанта електробалансу даної групи компресорів) визначається як добуток ймовірностей (p_i) появи кожної з альтернатив електроспоживання окремих компресорів, які утворюють відповідний варіант електробалансу [7, 8]:

$$p_c = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n. \quad (7)$$

Таким чином, всі достовірні варіанти балансу споживання електричної енергії групою аміачних компресорів, що розглядаються, можуть бути ранжирувані у порядку зменшення величини суміщеної ймовірності виникнення кожного з цих варіантів. При цьому можна стверджувати, що варіант, який має найбільшу суміщену ймовірність його появи, відображає найбільш ймовірну структуру витратної частини фактичного електробалансу цієї групи компресорів за відповідний період (наприклад, добу), тобто характеризує найбільш ймовірний розподіл загального обсягу споживання електроенергії всією групою компресорів, відомого за даними обліку електроспоживання, між окремими компресорами [8].

Наприклад, в таблиці 8 наведено обсяги споживання електроенергії за трьома найбільш ймовірними варіантами електробалансу групи аміачних компресорів, що розглядалися в цьому експерименті.

Таблиця 8 – Обсяги споживання електроенергії аміачними компресорами за трьома найбільш ймовірними електробалансами, побудованими з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу для доби з умовним номером 1

Компресор 1 (Фідер 3Г)		Компресор 2 (Фідер 28Г)		Компресор 3 (Фідер 4Г)		Компресор 4 (Фідер 3В)		Компресор 5 (Фідер 4В)		Група компресорів разом	
W_i	p_i	W_i	p_i	W_i	p_i	W_i	p_i	W_i	p_i	W_{Σ}	Суміщена ймовірність
99191,4	0,297	91462,2	0,344	101767,8	0,304	0	...	94038,6	0,338	386460	0,0032

Продовження табл. 8

95326,8	0,312	99191,4	0,31	96615	0,284	0	...	99191,4	0,307	390324,6	0,002566
103056	0,297	94038,6	0,344	94038,6	0,284	0	...	101767,8	0,307	392901	0,002548

Таблиця 9 містить результати порівняння обсягів споживання електричної енергії цієї групи компресорів, що являють собою статті найбільш ймовірного електробалансу, з їх фактичними значеннями, одержаними за даними обліку електроспоживання.

Таблиця 9 – Результат порівняння найбільш ймовірного електробалансу групи аміачних компресорів з їх фактичним балансом споживання електроенергії, одержаним за даними обліку електроспоживання для доби з умовним номером 1

Компресор	№1 (Фідер 3Г)	№ 2 (Фідер 28Г)	№ 3 (Фідер 4Г)	№ 4 (Фідер 3В)	№ 5 (Фідер 4В)	Група компресорів разом
$W_{\text{факт.}}$	104546,06	97617,31	98682,00	0	104950,00	405795,38
$W_{\text{найбільшймовірне}}$	99191,4	91462,2	101767,8	0	94038,6	386460
Відносна похибка δ	-0,0512182	-0,0630535	0,0312701	0	-0,1039676	-0,0476481

Таким чином наведені в таблицях 8 та 9 результати даного експерименту, які підтверджуються також результатами подібних розрахунків, виконаних для цієї ж групи компресорів для інших періодів часу, дозволяють зробити остаточні висновки щодо застосування двох різних підходів до побудови балансів споживання електричної енергії на виробничо-господарських об'єктах.

Висновки

1. В умовах недостатніх та нечітко заданих вихідних даних застосування спрощеного розрахунково-аналітичного методу для побудови балансів споживання електроенергії далеко не завжди є доцільним, а досить часто є взагалі неможливим, оскільки оцінки обсягів споживання електроенергії за окремими статтями електробалансів, одержані з використанням цього методу, здебільшого виявляються спотвореними і значною мірою не відповідають реальним витратам електричної енергії окремими установками чи агрегатами.

2. Одним з найбільш доцільних напрямів удосконалення методології побудови балансів споживання електроенергії на виробничо-господарських об'єктах в зазначених умовах слід вважати застосування для вирішення цієї задачі ймовірно-статистичних методів.

3. Як свідчать, зокрема, наведені в цій статті результати проведеного експерименту, створена авторами методологія складання електробалансів на основі ймовірно-статистичного підходу, у порівнянні з традиційним спрощеним розрахунково-аналітичним методом, дає змогу одержувати значно більш обґрунтовані та достовірні баланси споживання електричної енергії у виробництві.

Список використаної літератури

1. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Кочетова К.К. Аналіз діючих в Україні методик нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів. *Промелектро*. 2007. № 2. С. 42-48.

2. Архипов Л.И., Гаряев А.Б., Горбенко В.А. и др. Методы составления энергобалансов промышленных предприятий: учебное пособие по курсу «Энергобалансы промышленных предприятий» для студ., обучающ. по направлению «Теплотехника». М.: Издательство МЭИ, 2000. 48 с.

3. ДСТУ 4714:2007 Енергозбереження. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методика побудови та аналізу. Київ, ДП «УкпНДНЦ», 2007, 25 с.

4. Справочник по электроснабжению и электрическому оборудованию: В 2 т. Т.2. Электрооборудование / [Р.Б. Авринский, С.И. Вершинина, С.И. Гамазин и др.]; под общ. ред. А.А. Фёдорова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 592 с.

5. Находов В. Ф., Бориченко О.В. Ймовірносно–статистичний підхід до побудови енергобалансів виробничо – господарських об’єктів. *Промелектро*. 2007. № 6. С. 45-54.
6. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Побудова оптимальних розрахункових моделей електробалансів виробничо-господарських об’єктів. *Промелектро*. 2010. № 6. С. 47–51.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк, 2003. 479 с.
8. Paolo L. Gatti. Probability Theory and Mathematical Statistics for Engineers. London: Spon Press, 2005. 368 p.
9. Вартазаров И.С., Горлов И.Г., Минаев Е.В., Хвастунов Р.М. Экспертные оценки и их применение в энергетике. М.: Энергоиздат, 1981. 188 с.

V. Nakhodov, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-7643-5965
O. Borychenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-6127-2945
V. Oliinyk, Msc.
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

APPLICATION PROBABILISTIC-STATISTICAL APPROACH FOR CONSTRUCTION OF ELECTRICAL BALANCES OF AMMONIA DEPARTMENT

The article considers the improvement of the methodology for constructing the balance of electricity consumption based on the use of methods to obtain more objective and verifiable background information, including methods of collecting and compiling the necessary statistics. That is to improve the results of constructing energy balance of production facilities necessary to apply probabilistic and statistical methods. Construction of electric balances of production facilities using a probabilistic-statistical approach can be based on the construction of multifactor mathematical models of electricity consumption by the enterprise as a whole and its units, on establishing confidence intervals for these models, on determining options for possible electricity use by individual units or on production certain types of products, as well as to identify the most likely distribution of energy at the facility. Using the probabilistic-statistical approach, which is proposed to be used in the conditions of uncertainty of the initial data, it is possible to build more reliable balances of electricity consumption of industrial facilities than with the help of calculation and analytical method. However, the possibility of applying probabilistic and statistical methods for constructing of electric balances may be considerably complicated for enterprises with a wide range of products and complex, extensive circuit manufacturing process when manufacturing certain products involves many departments.

Keywords: *balance of electricity consumption, probabilistic and statistical method, confidence intervals, calculation and analytical method, compressor, ammonia department.*

REFERENCES

1. Nakhodov V. F., Borychenko O. V., Kochetova K.K. Analysis of current methods of standardization of specific costs of fuel and energy resources in Ukraine. *Promelektro*. 2007. No 2. Pp. 42-48. (Ukr)
2. Arkhypov L. Y., Garyayev A. B., Gorbenko V. A. and others. Methods of construction energy balances of industrial enterprises: a textbook for the course "Energy balances of industrial enterprises" for students which training in the direction of "Heat engineering". Moscow: Publisher MEI, 2000. 48 p. (Rus)
3. State Standard of Ukraine 4714:2007 Energy saving. Energy balance of industrial enterprises. The method of construction and analysis. Kyiv, DP "UkrNDNTs", 2007, 25 p. (Ukr)
4. Handbook on power supply and electrical equipment: 2 vol. Vol. 2. Electrical equipment / [R. B. Avrinskiy, S. Y. Vershinina, S. Y. Gamazin and others]; under total. ed. A.A. Fedorova. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 592 p. (Rus)
5. Nakhodov V. F., Borychenko O. V. Probabilistic and statistical approach to construction energy balance of industrial and commercial facilities. *Promelektro*. 2007. No 6. Pp. 45-54. (Ukr)
6. Nakhodov V. F., Borychenko O. V. Construction of optimal calculation models of electric balances of production and economic objects. *Promelektro*. 2010. No 6. Pp. 47-51. (Ukr)
7. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola, 2003. 479 p. (Rus)
8. Paolo L. Gatti. Probability Theory and Mathematical Statistics for Engineers. London: Spon Press, 2005. 368 p.
9. Vartazarov I.S., Gorlov I.G., Minayev E.V., Khvastunov R.M. Expert assessments and their application in the energy sector. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 188 p. (Rus)

Надійшла 15.11.2020
Received 15.11.2020

В. І. Дешко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933
І.Ю. Білоус, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6640-103X
Н.А. Буяк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-0597-6945
О.В. Петрученко, ORCID 0000-0002-4982-4217
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Світові тенденції підвищення рівня енергетичної ефективності будівель спрямовані на зменшення споживання енергії до майже нульового споживання (nZEB). Для досягнення рівня nZEB потрібне впровадження комплексу енергозберігаючих заходів з покращення теплофізичних властивостей огорожень, інженерних систем будівлі та використання відновлювальних джерел енергії. Одним з малозатратних та енергоефективних заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності будівель є впровадження енергоефективних переривчастих режимів опалення будівель. Зазвичай, даний захід є доцільним та можливим після термомодернізації будівлі. Визначення енергетичних характеристик будівель за впровадження переривчастих режимів опалення потребує використання математичних моделей. В роботі проведено порівняння застосування різних математичних моделей та методів для оцінки економії теплової енергії при термомодернізації та впровадженні переривчастих режимів опалення. Розрахунок проведений для житлової будівлі та гімназії, розташованої в місті Києві. Впровадження комплексу заходів з термомодернізації огорожень будівель дозволить зменшити споживання теплової енергії на 60 та 35% для ЖБ та гімназії, відповідно. Впровадження переривчастих режимів опалення для будівель після термомодернізації сучасних будівель дозволяє заощадити на опаленні понад 15% - визначено на основі програми RETScreen, 10% - на основі динамічної сіткової моделі 5RIC, 22% - на основі квазістаціонарного методу, за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, для житлового будинку та будівлі гімназії, розташованих в м. Київ.

Ключові слова: математичне моделювання, будівлі, переривчасті режими опалення, енергозбереження.

Вступ

Будівельний сектор європейських країн все більше орієнтується на майже нульове споживання енергії, відповідно до директиви ЄС про енергетичну ефективність будівель 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive — EPBD) [1]. В Україні, як і в інших країнах світу, що приєдналися до цієї директиви, проводиться активна політика щодо підвищення рівня енергетичної ефективності житлово-комунального сектору. Покращення теплозахисних властивостей огорожень будівель є першими кроками на шляху до будівель з майже нульовим споживанням енергії (nZEB) [2]. Для оцінки мінімальних вимог до рівня енергоефективності міжнародні стандарти регулярно змінюються та вдосконалюються/деталізуються, Україна адаптує внутрішні стандарти в руслі змін міжнародних.

В Україні переважна більшість будівель зведена в період масової забудови, для яких характерний низький рівень теплозахисних властивостей огорожень. Аналогічна ситуація в країнах пострадянського простору та країнах Східної Європи, наприклад Польщі. В Україні кожні 5 років переглядають мінімально допустимі вимоги для досягнення рівня енергоефективності будівель, наприклад, в Польщі ці показники переглядаються кожні 3 роки [3]. З 2014 року до 2021 року вимоги до теплозахисних властивостей будівель в середньому підвищилися до 10% в Україні та 35% – в Польщі, а саме зовнішні стіни – 0% та 25%, вікна – 0% та 44%, горищене перекриття – 10% та 33%, вхідні двері – 20% та 30%, відповідно до стандартів України (рис. 1,а) та Польщі (рис. 1,б) [3-5]. Враховуючи світові тенденції, щодо доведення будівель до nZEB, Україні потрібно розробити національні критерії щодо оцінки та підвищення рівня енергетичної ефективності будівель.

На даний час при підвищенні рівня енергоефективності існуючого фонду будівель в Україні активно впроваджуються енергозберігаючі заходи з покращення теплофізичних властивостей оболонки будівель та покращення роботи інженерних мереж з впровадженням енергоефективних режимів опалення. Впровадження енергоефективних/розумних режимів опалення будівель є невід'ємною складовою стратегій переходу країни від енергоефективності до енергонезалежності [6].

© В. І. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А. Буяк, О.В. Петрученко, 2020

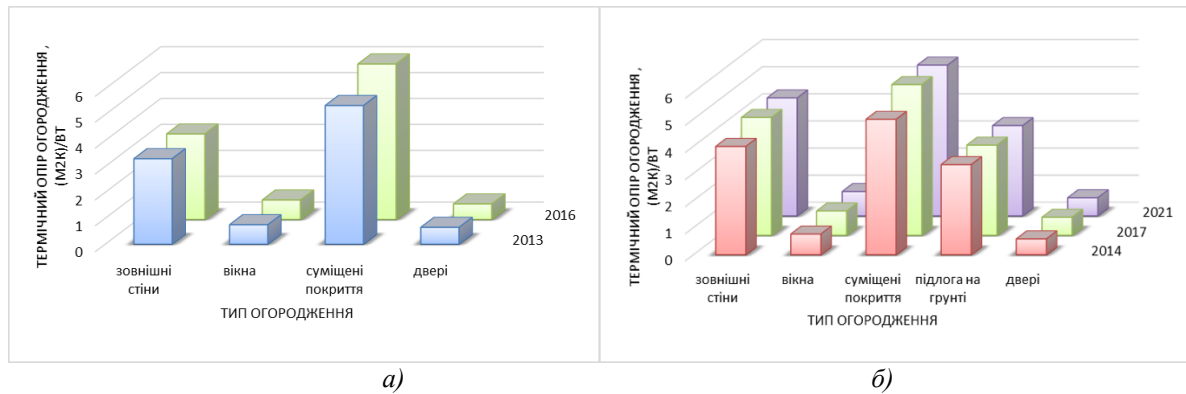


Рисунок 1 – Мінімальний термічний опір огорожень будівлі в Україні (а) та Польщі (б)

Мінімально допустимі вимоги до енергоефективності будівель з часом стають все вищими, а отже для їх виконання не достатнім є впровадження заходів зі зменшення трансмісійної складової втрат теплоти будівлі, необхідно приділяти більшу увагу системам теплозабезпечення будівель, їх керуванню, враховуючи експлуатаційні вимоги, поведінку та потреби користувачів. Для аналізу економічного ефекту від впровадження переривчастих режимів опалення необхідно використовувати математичні моделі для аналізу енергетичних та комфортних показників будівель. В Україні діє стандарт щодо оцінки енергетичної ефективності будівель ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [7], в якому регламентовано укрупнений підхід до оцінки переривчастих режимів опалення. Стандарт [7] проводить розрахунок для помісячних інтервалів, враховує лише графік зміни температури внутрішнього повітря в часі та не враховує теплоаккумуляційні властивості внутрішніх огорожень, радіаційну температуру поверхонь огорожень, добові коливання зовнішньої погодних умов та інше.

Річна енергопотреба будинку в теплі та/або охолодженні визначається за методикою [7]:

$$Q_o^{pik} = \sum_{i=1}^n Q_{HC.nd.i} \quad (1)$$

i – порядковий номер опалювального місяця;

n – кількість опалювальних місяців;

$Q_{HC.nd}$ – місячна енергопотреба для опалення або кондиціонування, Вт·год.

$$Q_{HC.nd} = Q_{HC.tr} + \eta_{HC.gn} Q_{HC.gn} \quad (2)$$

$Q_{HC.tr}$ – місячна сумарна теплопередача трансмісією та вентиляцією, Вт·год;

$Q_{HC.gn}$ – місячні сумарні теплонадходження в режимі опалення, Вт·год;

$\eta_{HC.gn}$ – безрозмірний місячний коефіцієнт використання надходжень.

$$Q_{HC.hr} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (3)$$

Q_{tr} – теплопередача трансмісією по місяцям, Вт·год;

Q_{ve} – теплопередача вентиляцією, кВт·год.

$$Q_{HC.gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (4)$$

Q_{int} – сума внутрішніх теплонадходжень протягом даного періоду, Вт·год;

Q_{sol} – сума сонячних теплонадходжень протягом даного періоду, Вт·год.

$$Q_{tr} = H_{nr}(\theta_{int} - \theta_e)t, \quad (5)$$

H_{nr} – провідність трансмісією зони, Вт/К;

θ_{int} – задана температура зони будівлі для опалення, °С;

θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, °С;

t – тривалість місяцю для якого проводиться розрахунок, год.

$$Q_{ve} = H_{ve}(\theta_{int} - \theta_e)t, \quad (6)$$

H_{ve} – провідність вентиляцією, Вт/К.

Коригування для переривчастого режиму опалення

$$Q_{HC.nd,interm} = \alpha_{HC.red} Q_{HC.nd,cont} \quad (7)$$

$Q_{HC.nd,cont}$ – енергопотреба для постійного опалення, кВт·год,

$\alpha_{HC.red}$ – безрозмірний понижувальний коефіцієнт для переривчастого режиму опалення,

$$\alpha_{HC.red} = 1 - b_{HC.red} \left(\frac{\tau_{H,0}}{\tau} \right) \gamma_H (1 - f_{H.hr}) \quad (8)$$

$b_{HC.red}$ – емпіричний коефіцієнт кореляції, $b_{HC.red} = 3$,

$\tau_{H,0}$ – довідкова часова константа для режиму опалення, $\tau_{H,0} = 15$ год,

τ – часова константа зони будівлі, год,

γ_H – безрозмірне співвідношення надходжень і втрат теплоти для режиму опалення,

$f_{h,hr}$ – частка кількості годин на тиждень з нормальним (постійним) заданим режимом опалення.
 $\tau = C_m / (H_{hr} + H_{ve})$ (9)

C_m – внутрішня теплоємність будівлі, Вт·год/К.

На сьогодні існує ряд програмних комплексів для визначення енергоспоживання будівель на основі стаціонарних, квазістаціонарних та динамічних методів. Найбільш деталізованими та наближеними до реальних умов є динамічні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель [8]. В Україні прийнято стандарт, який наводить методику розрахунку енергопотреби на базі динамічного погодинного методу розрахунку [9]. В основі – динамічна сіткова модель 5R1C [8, 9], на базі стандартів EN ISO 13790 та EN 13786 [10]. Математична модель 5R1C дозволяє проводити погодинний розрахунок енергетичних характеристик будівель, враховувати показники комфорту з урахуванням теплоаккумуляційних властивостей внутрішніх та зовнішніх огорожень, мінливості погодно-кліматичних умов, графіку використання приміщень та інше. Використання моделі потребує написання або використання існуючих програм для реалізації даного методу. Схема реалізації моделі наведена на рис. 2, що включає зовнішні стіни, віконні отвори та вентиляцію, які характеризуються в схемі блоками провідності H_{op} , $H_{tr,w}$, H_{ve} , відповідно.

Енергопотреба знаходяться за розрахунком потужності опалення чи охолодження для кожної години, $\Phi_{HC,nd}$, що повинна бути надана до, або відібрана з вузла температури внутрішнього повітря, θ_{air} , для підтримання певної мінімальної або максимальної заданої температури. Задана температура є середньозваженою за температурою повітря та середньою радіаційною температурою.

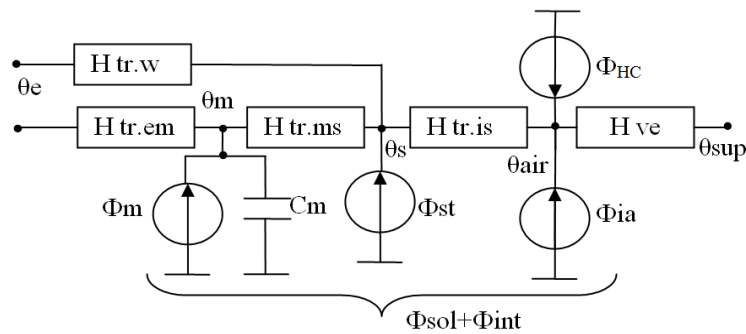


Рисунок 2 – Модель п'ять опорів, одна ємність (5R1C) [11]

Провідність через вентиляцію, H_{ve} , прямо пов'язана з вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та вузлом, що відображає температуру припливного повітря, θ_{sup} . Провідність трансмісією поділяється на частину через світлопрозорі отвори, $H_{tr,w}$, що приймається з нульовою тепловою масою, та через непрозорі елементи зовнішніх огорожень H_{op} , що має тепловою масою, яка, в свою чергу, поділяється між двома блоками: сполучення провідністю між вузлами m та зовнішнім середовищем, $H_{tr,em}$, та сполучення провідністю між вузлами m та s , $H_{tr,ms}$. Сонячні та внутрішні теплові надходження розподіляються між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , центральним вузлом, θ_s (суміш θ_{air} та середньої радіаційної температури θ_r) та вузлом, що представляє масив зони будівлі, θ_m . Теплова маса відображується теплоємністю, C_m , визначеною між $H_{tr,ms}$ та $H_{tr,em}$. Сполучення провідністю визначається між вузлом температури внутрішнього повітря та центральним вузлом. Величина теплового потоку за рахунок внутрішніх джерел, Φ_{int} , та величина теплового потоку в зону кімнати за рахунок сонця, Φ_{sol} , поділені між трьома вузлами: температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та внутрішніми вузлами, θ_s , θ_m . Дана схема реалізована на базі стандартів EN ISO 13790, EN 13786 [11].

$$H_{tr,is} = h_{is} A_{tot} \quad (10)$$

$$H_{tr,ms} = h_{ms} A_m \quad (11)$$

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{op}} + \frac{1}{H_{tr,ms}}} \quad (12)$$

$$H_{tr,1} = \frac{1}{\frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{tr,is}}} \quad (13)$$

$$H_{tr,2} = H_{tr,1} + H_{tr,w} \quad (14)$$

$$H_{tr,3} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,2}} + \frac{1}{H_{tr,ms}}} \quad (15)$$

$$C_m = \sum k_j A_j \quad (16)$$

$$\Phi_{m,tot} = \Phi_m + H_{tr,em}\theta_e + \frac{H_{tr,3}(\Phi_{st} + H_{tr,w}\theta_e + H_{tr,1}(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd} + \theta_{sup}}{H_{ve}}))}{H_{tr,2}} \quad (17)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}}{2} \quad (18)$$

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1}(\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{tr,3} + H_{tr,em})) + \Phi_{m,tot}}{\frac{C_m}{3600} + 0,5(H_{tr,3} + H_{tr,em})} \quad (19)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr,ms}\theta_m + \Phi_{st} + H_{tr,w}\theta_e + H_{tr,1}(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd} + \theta_{sup}}{H_{ve}})}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (20)$$

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr,is}\theta_s + H_{ve}\theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (21)$$

$\Phi_{ia}, \Phi_m, \Phi_{st}$ – внутрішні тепловиділення та сонячні тепло надходження, які діляться між 3-ма вузлами, $\theta_{air}, \theta_s, \theta_m$;

$\Phi_{m,tot}$ – загальний тепловий потік, Вт;

h_{is} – коефіцієнт теплопередачі між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та центральним вузлом, θ_s , з фіксованим значенням $h_{is} = 3,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

h_{ms} – коефіцієнт теплопередачі між вузлами m та s, з фіксованим значенням $h_{ms} = 9,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

A_m – ефективна масова площа, м²;

A_j – площа j-го елемента огорожень, м²;

A_{tot} – площа всіх зовнішніх огорожень зони будівлі, м²;

C_m – внутрішня теплоємність, Дж/К;

k_j – внутрішня теплоємність на одиницю площі j-го елемента будівлі, Дж/(м²·К);

$H_{tr,is}$ – сполучення провідністю між вузлами s та внутрішнім повітрям, Вт/К;

$H_{tr,1}, H_{tr,2}, H_{tr,3}$ – првідність умовних вузлів 1, 2, 3, Вт/м.

На практиці для оцінки доцільності впровадження енергозберігаючих заходів використовують програмне забезпечення RETScreen [12], яке дозволяє провести аналіз і визначити енергетичну, екологічну і фінансову доцільність енергозберігаючих проектів реновації будівель. Програмне забезпечення може бути використане для оцінки проектів, що включають різні заходи з підвищення енергоефективності, пов'язаних з огорожувальною конструкцією будівель, вентиляцією, освітленням, електрообладнанням, гарячим водопостачанням, насосами, вентиляторами, двигунами, процесами з використанням електроенергії, технологічної теплоти, технологічної пари, рекуперацією енергії, а також оцінити втрати тепла (пари), стисненого повітря тощо. Такий підхід є корисним як для нового будівництва, так і для модернізації будівель. Програма передбачає можливості як для комплексного моделювання об'єктів, так і надає можливість вивчати окремі зони, підсистеми або квартири.

З наведено огляду слідує, що кожна з моделей має свої особливості і доцільним є порівняння використання різних математичних моделей для оцінки потенціалу енергозбереження шляхом впровадження комплексу енергозберігаючих заходів щодо покращення огорожень будівлі та впровадження переривчастих режимів опалення.

Мета та завдання

Метою роботи є дослідження переривчастих режимів опалення для будівель різного призначення після термомодернізації.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1) розрахунок потенціалу від впровадження комплексу заходів, щодо покращення теплофізичних властивостей огорожень.

2) створення енергетичної квазістаціонарної моделі будівлі для дослідження переривчастих режимів опалення;

3) створення сіткової динамічної енергетичної моделі будівлі для дослідження переривчастих режимів опалення;

4) Порівняльний аналіз використання переривчастих режимів опалення визначеного на основі різних підходів для різного призначення приміщень.

Матеріал та результати досліджень

Вихідні дані.

Об'єктами дослідження обрано:

1) 5 поверхова житлова будівля (ЖБ), 60 квартир, 1961 року побудови, Опалювальний об'єм будівлі – 7802,7 м³, опалювальна площа – 2737,8 м².

2) 2 поверхова будівля гімназії 1926 року побудови, де навчається 85 учнів. Опалювальний об'єм будівлі – 2324 м³, опалювальна площа – 774,6 м².

Будівлі розташовані в місті Київ. В будівлях проведена часткова заміна вікон, непрозорі елементи огорожень відповідають теплофізичним властивостям огорожень років забудови.

Таблиця 1 – Термічний опір огорожень будівель

вид огороження	Існуючий стан		Після термомдернізації	
	гімназія	ЖБ	гімназія	ЖБ
	Термічний опір огорожень, м ² К/Вт			
зовнішні стіни	0,9	0,7	3,3	3,56
вікна	0,34	0,5*	0,93	0,8
дах	1,97	1,13	4,95	4,95
підлога	0,5	2	2	5
двері	0,35	0,35	0,6	0,6

* - частково проведена заміна вікон

В роботі проведено розрахунок впровадження комплексу енергозберігаючих заходів по покращенню теплофізичних характеристик огорожень та впровадженню енергоефективних режимів опалення на основі квазістаціонарної моделі за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [7], стаціонарної моделі створеної на базі програмного продукту RETScreen [12] та динамічної моделі 5R1C за стандартами EN ISO 13790 та EN 13786 [11].

Комплекс енергозберігаючих заходів по покращенню теплофізичних властивостей оболонки будівлі включає утеплення стін мінеральною ватою 10 см, утеплення даху керамзитом – 30 см, вікна – двокамерні металопластикові енергозберігаючі склопакети, металопластикові входні двері. Після впровадження комплексу енергозберігаючих заходів баланс тепловтрат будівель наведений на рис 3.

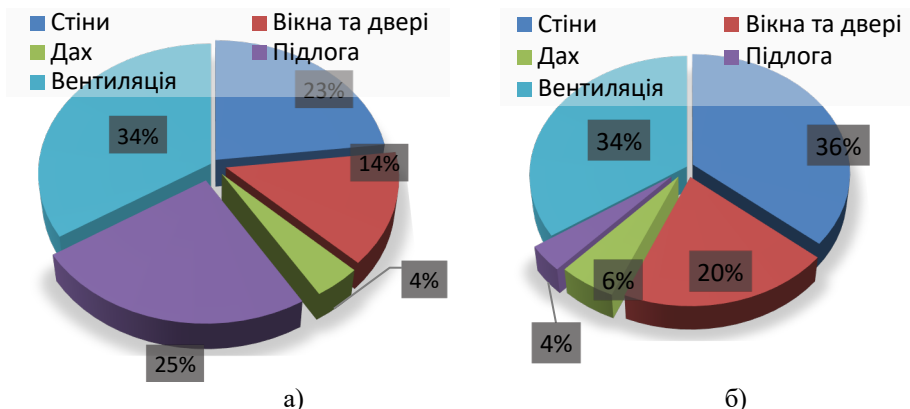


Рисунок 3 – Енергобаланс тепловтрат гімназії (а) та житлової будівлі (б)

В табл.2 наведено розрахунок потенціалу енергозбереження на основі 3-х раніше згаданих методів. Можлива економія теплової енергії після покращення теплозахисних властивостей оболонки будівлі становить: 30 та 55% - за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, 40 та 65% - RETScreen та 35 та 60% - за динамічною моделлю 5R1C, для гімназії та ЖБ, відповідно. Відмінність результатів розрахунку пояснюється тим, що за методикою ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [7] теплоакумуючі властивості враховуються укрупнено, а саме через показник С, який характеризує теплоємність будівлі на одиницю площі (враховує акумуляцію зовнішніх огорожень). Для більшої частини будівель $C = 80 \text{ Вт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\text{К})$, що характерно для класу «важких» будівель, тобто для капітальних будівель з цегляними стінами товщиною (1,5-2 цеглини), із залізобетонними перекриттями. Програмний продукт RETScreen не враховує теплоакумуючих властивостей огорожень. Динамічна математична модель 5R1C враховує теплоакумуляційні властивості внутрішніх і зовнішніх огорожень будівлі. Відсоток економії при впровадженні комплексу енергозберігаючих заходів по покращенню теплофізичних властивостей в будівлі гімназії менший ніж в ЖБ, обумовлюється різними початковими термічними опорами огорожень, який був типовим для їх періоду зведення.

Потрібно відмітити, що розрахунок на базі трьох наведених математичних моделей використовує кліматичні дані різних часових інтервалів, які створені різними базами даних. RETScreen використовує кліматичні дані отримані та узагальнені NASA [12], динамічна модель 5R1C потребує погодинних кліматичних даних, тому використано погодинні кліматичні дані типового року файлу IWEC [13]. ДСТУ Б

A.2.2-12:2015 використовує середньомісячні дані з будівельної кліматології України [14]. Порівняльний аналіз кліматичних даних наведених проведений в статті [15].

Таблиця 2 – Споживання теплової енергії будівлями

Характеристика розрахунку	Призначення будівлі	RETScreen	ДСТУ Б А.2.2-12:2015	5R1C
		кВт год/рік		
існуючий стан	Гімназія	152433	165620,7	146285,7
	ЖБ	357955,8	416738,1	390139,5
після термомодернізації	Гімназія	84302	117473,8	94559,5
	ЖБ	120647,8	197509,5	138411,7
впроваджено переривчасті режими	Гімназія	70538,2	91428,7	84345,4
	ЖБ	104536,4	153624,5	124905,6

При модельному розрахунку впровадження переривчастих режимів опалення часовий інтервал пониження температури на 3°C обраний однаковий та становить 12 годин. Особливість двох розрахунків, що для гімназії характерним є пониження температури повітря в нічний час доби за відсутності учнів, в житловому будинку пониження температури відбувається в денний період доби, коли більша частина мешканців не знаходиться в будівлі. В денний період доби присутні сонячні тепло надходження в зону будівлі, що впливає на енергетичні характеристики будівлі.

З таблиці 2 слідує, що економія теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення для будівель з покращеними теплозахисними властивостями оболонки будівель становить: 22% - за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, 16 та 13% - RETScreen та 11 та 10% - за динамічною моделлю 5R1C, для гімназії та ЖБ, відповідно. Для гімназії характерна орієнтація світлопрозорих елементів конструкцій на всі чотири сторони світу (Пн, Пд, Зх, Сх), площа застакнення на Пн та Пд орієнтації в двічі більша порівняно з Сх та Зх орієнтаціями фасадів. Для розглянутого ЖБ присутні вікна лише на Зх та Сх фасадах будівлі. Коефіцієнт застакнення для розглянутих репрезентативних будівель становить 0,25.

Отриманий відсоток економії теплової енергії за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 для гімназії та ЖБ однакові, що пояснюється тим, що в значній мір економія теплової енергії залежить від співвідношення годин роботи з нормативною температурою $f_{н,hr}$ та рекомендованою температурою в період відсутності людей. Для розглянутих будівель період пониження рівня опалення становить 12 годин: для гімназії – в нічний період доби, для ЖБ – в денний.

Наведені значення економії теплової енергії від впровадження переривчастих режимів опалення – це максимально можливі значення економії теплової енергії будівлі для розглянутої глибини і інтервалу пониження температури в неробочі години в період відсутності людей. Доцільним є впровадження переривчастих режимів для окремих зон будівлі з врахуванням поведінково-експлуатаційних особливостей мешканців/відвідувачів для забезпечення комфортних умов в період перебування людей, що особливо актуальне для ЖБ, де режими експлуатації зон/квартир суттєво відрізняються.

Економія теплової енергії залежить від погодних коливань та змінюється протягом опалювального періоду. На рис. 4 наведено економію теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення для помісячних інтервалів. На рис 4 представлені результати розрахунку за квазістаціонарним методом за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 та динамічною моделлю 5R1C. Використання програми RETScreen не дозволяє провести розрахунок для помісячних інтервалів. Розрахунок за динамічною моделлю 5R1C проведений для подинних інтервалів зміни кліматичних даних та узагальнено для помісячних інтервалів.

Розрахунок за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 дозволяє враховувати сезонні кліматичні коливання, за динамічною моделлю 5R1C можливе врахування сезонних та добових коливань, що обумовлює відмінність отриманої економії енергії від впровадження переривчастих режимів опалення (рис. 4, за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 більша порівняно з динамічною моделлю 5R1C). За квазістаціонарним методом (ДСТУ Б А.2.2-12:2015) сезонна складова економії енергії від впровадження переривчастих режимів опалення залежить від величини γ_H (формула 8), безрозмірного співвідношення надходжень і втрат теплоти для режиму опалення. Для місяців лютий-квітень, жовтень (період весняного/осіннього міжсезоння та лютого, для яких характерна висока сонячна активність) величина коефіцієнту γ_H є максимальною: 0,17...0,4 – для ЖБ, 0,11...0,25 – для гімназії. Для періоду року з найменшою сонячною активністю (листопад-січень) величина економії теплової енергії змінюється менше (біля 30%) за ДСТУ Б А.2.2-12:2015, а величина коефіцієнту γ_H знаходиться в діапазоні 0,03...0,07.

Впровадження переривчастих режимів опалення дозволяє зменшити споживання теплової енергії в період відсутності людей шляхом пониження навантаження на систему опалення або короткостроковим відімкненням його, залежно від погодних умов, але для періоду присутності людей для забезпечення

комфортної нормативної температури повітря в будівлі теплове навантаження на систему опалення повинно бути збільшене порівняно з рівнем опалення, коли дотримується постійне значення температури повітря в приміщеннях будівлі, що в свою чергу призводить до збільшення споживання теплової енергії.

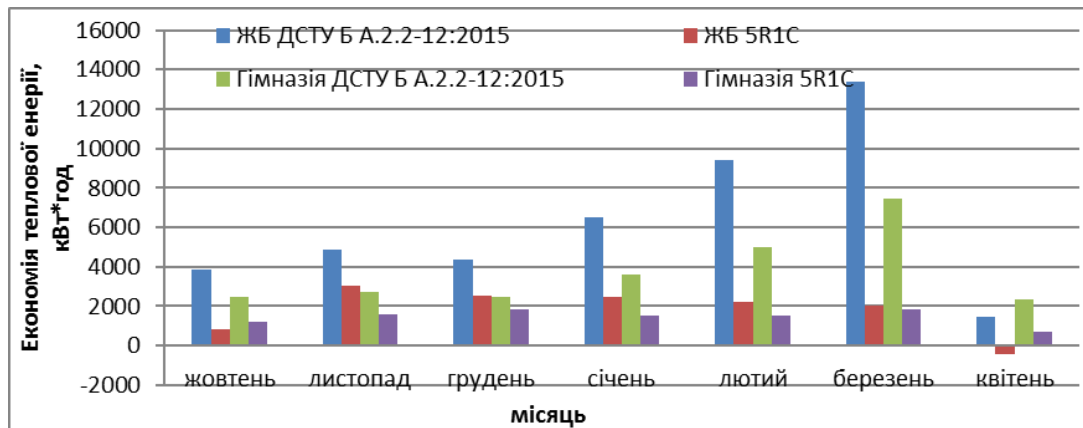


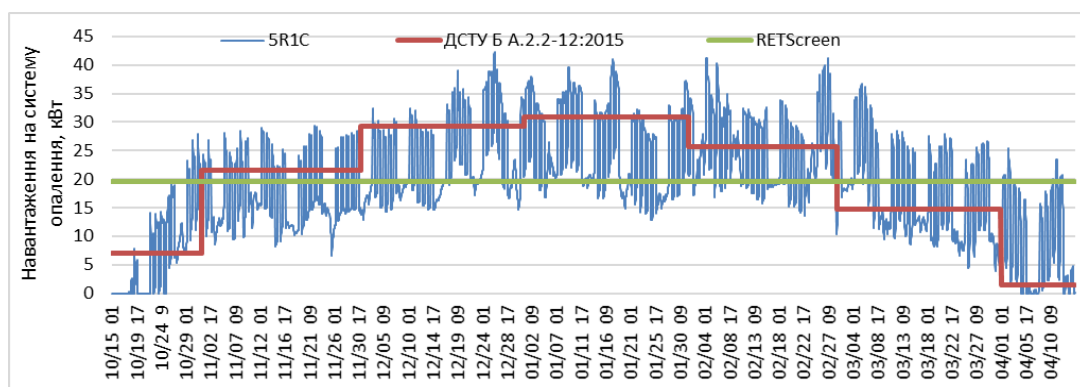
Рисунок 4 – Економія теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення

На рис. 4 для квітня для результатів розрахунку за моделлю 5R1C спостерігається, що для ЖБ впровадження переривчастих режимів опалення призводять до перевитрати теплової енергії, тобто величина споживання теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення на 400 кВт·год більше порівняно з постійними режимами. Потрібно відміти, що такий ефект залежить від орієнтації вікон, коефіцієнту застібання, тому кожену будівлю потрібно розглядати індивідуально. Для гімназії спостерігається протилежний ефект для квітня, що пояснюється двома особливостями: 1) особливістю розташування світлопрозорих елементів конструкцій на фасадах будівлі різної орієнтації (40% вікон розташовані на Пд орієнтації); 2) період пониження температури в неробочі години (нічна частина доби).

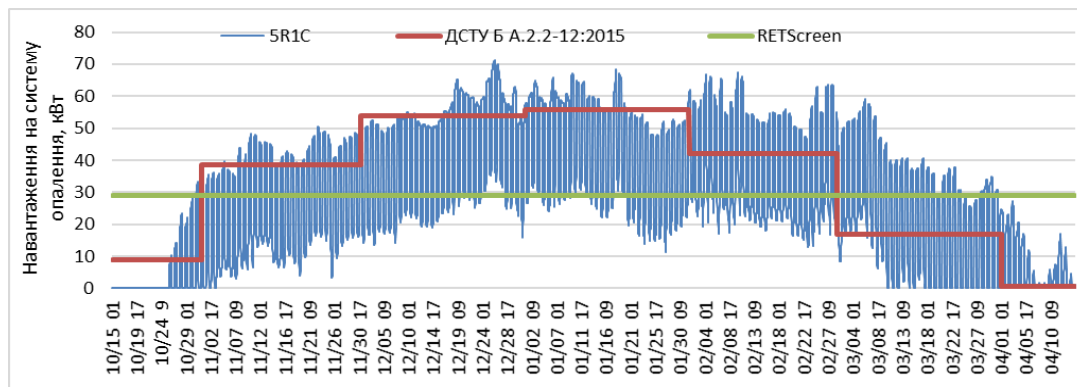
При виборі характеристик переривчастих режимів опалення слід враховувати співвідношення між величиною збільшення запасу теплової потужності та величиною пониження температури в неробочі години, які пов'язані обернено. При проектуванні зазвичай приймається 20% запасу теплової потужності.

На рис. 5 наведено теплове навантаження на систему опалення за трьома розглянутими методами: стаціонарний (програма RETScreen), квазістаціонарний (ДСТУ Б А.2.2-12:2015), динамічний метод 5R1C. Використання динамічного моделювання дозволяє об'єктивно оцінювати і передбачати споживанням енергії при дотриманні умов комфорту в період зайнятості приміщень будівлі.

Визначення навантаження на систему опалення за стаціонарним методом на основі програми RETScreen зображено на рис. 5 прямою лінією та може бути використане лише для оціночних розрахунків. З рис. 5 видно, що конфігурація графіку теплового навантаження на систему опалення визначеного для помісячних інтервалів за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 має однакову конфігурацію для ЖБ та гімназії. Конфігурація погодинного навантаження на систему опалення розрахованого на основі динамічної сіткової моделі 5R1C має відмінний характер, що пояснює відпрацювання переривчастого режиму опалення при впровадженні його в різний час доби, тобто пониження температури в денний чи нічний час. Крім цього однією з найбільш вагомих складових впливу на енергоспоживання будівлі після термомодернізації є сонячні теплонадходження, які прямо залежать від площі та орієнтації вікон.



а)



б)

Рисунок 5 – Навантаження на систему опалення при впровадженні переривчастих режимів опалення в гімназії (а) та житловій будівлі (б)

Висновки

В роботі проведено аналіз впровадження комплексу енергозберігаючих заходів з покращення теплофізичних властивостей оболонки гімназії та житлової будівлі, а також впровадження переривчастих режимів опалення. Створено математичні моделі будівель на основі квазістаціонарної моделі за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, стаціонарної моделі створеної на базі програмного продукту RETScreen та динамічної моделі 5R1C за стандартами EN ISO 13790 та EN 13786.

Розглянуті будівлі не відповідають сучасним вимогам, що висуваються до теплозахисних властивостей огорожень. Встановлено, можлива економія теплової енергії після покращення теплозахисних властивостей оболонки будівель до сучасних вимог становить біля 40% – за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, біля 50% – RETScreen та біля 45% – за динамічною моделлю 5R1C. Відмінність отриманих результатів оцінки потенціалу енергозбереження залежить від урахування теплоаккумуляційних властивостей внутрішніх та зовнішніх огорожень, а саме RETScreen – не враховує, ДСТУ Б А.2.2-12:2015 – враховує укрупнене лише зовнішні огороження, 5R1C – враховує внутрішні і зовнішні огороження через спільний вузол теплоаккумуляції «С».

При впровадженні переривчастих режимів опалення шляхом пониження температури на 3°C від нормативної тривалістю 12 годин на добу: гімназія в нічний час доби понижує температуру, ЖБ – в денний час, що характерно експлуатаційно-поведінковим особливостям експлуатації будівель. За результатами моделювання встановлено, що за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 максимально можлива економія теплової енергії за опалювальний сезон становить 22%, 15% – RETScreen та 10% – за динамічною моделлю 5R1C.

В подальших дослідженнях планується розглянути різні типи контролерів та відпрацювання ними зміни переривчастих чи постійних режимів опалення будівель, а також дослідити вплив режимів роботи системи опалення у вихідні дні, що може збільшити відсоток економії енергії для гімназії та зменшити – для ЖБ.

Список використаної літератури

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 - Energy Performance of Buildings Directive — EPBD //EN L 153/13, 19.05.2010, p. 23.
2. Nematchoua M.K, Marie-Reine Nishimwe A., Reiter S. Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
3. Fedorczak-Cisak M., Knap K., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Pekarchuk O. Energy and Cost Analysis of Adapting an Existing Building to 2017 Technical Requirements and Requirements for NZEB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 471, Issue 11, 24 February 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112094
4. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. [На заміну СНиП II-3-79 ; чинний від 2007.04.01 зі Зміною №1 від 1 липня 2013 року]. К.: Мінбуд України, 2006. 70 с.
5. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель [Чинний з 08.10.2016]. К.: Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2016. 33 с.
6. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А. ВПЛИВ ПЕРЕРИВЧАСТИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ НА ДИНАМІКУ ЕНЕРГОПОТРЕБИ ТА УМОВИ КОМФОРТНОСТІ БУДІВЕЛЬ З РІЗНИМ РІВНЕМ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ. *Наукові вісті НТУУ КПІ*. 2019. №4. С. 7-16.

7. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні / ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2015, - 203 с.

8. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub I.O. MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF SPECIFIC ENERGY NEED FOR HEATING USED IN UKRAINE. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2018. No.1. Pp. 13-25.

9. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні (EN ISO 13790:2008, IDT). [На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013]. К. : НДІБК, 2011. 229 с.

10. EN ISO 13786:2007. Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. — CEN. European Committee for Standardization, 2007. 27 p.

11. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. 96(4). Pp. 27–41.

12. RETScreen - Clean Energy Management Software [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>

13. International Weather for Energy Calculations: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.

14. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. К., 2011. 127 с.

15. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». Випуск №4 Київ 2017. С 67-73.

V. Deshko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

I. Bilous, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6640-103X

N. Buyak, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-0597-6945

O. Petruchenko, ORCID 0000-0002-4982-4217

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ENERGY EFFICIENT HEATING MODES ON BUILDINGS ENERGY USE BASING ON THE MATHEMATICAL MODELING

Global trends of increasing the buildings energy efficiency are aimed at reducing energy use to nearly zero consumption (nZEB). Achieving the nZEB level requires the implementation of a set energy-saving measures to improve the thermophysical properties of fences, building engineering systems and the use of renewable energy sources. One of low-cost and energy-efficient measures to increase the level of energy efficiency of buildings is the introduction of energy-efficient intermittent heating modes of buildings. Usually, this measure is appropriate and possible after the thermal modernization of the building. Determining the energy performance of buildings for the introduction of intermittent heating modes requires the use of mathematical models. The paper compares the application of different mathematical models and methods for estimating thermal energy savings in thermal modernization and implementation of intermittent heating modes based on the quasi-stationary model according to DSTU B A.2.2-12: 2015, stadium model created on the basis of RETScreen software and dynamic model 5R1C according to EN ISO 13790 and EN 13786. Heat-accumulation properties of building enclosures in RETScreen are not taken into account, in DSTU B A.2.2-12: 2015 - are taken into account for external enclosures, 5R1C - both internal and external enclosures are taken into account. The calculation was made for a residential building and a gymnasium located in the city of Kyiv. The introduction of a set of measures for thermal modernization of building fences will reduce heat consumption by 60 and 35% for residential building reinforced and gymnasiums, respectively. Introduction of intermittent heating modes for buildings after thermal modernization / modern buildings allows to save on heating more than 15% - determined on the basis of RETScreen program, 10% - on the basis of dynamic grid model 5R1C, 22% - on the basis of quasi-stationary method according to DSTU B A.2.2-12: 2015, for a residential building and a gymnasium building located in Kyiv.

Keywords: mathematical modeling, buildings, intermittent heating modes, energy saving.

REFERENCES

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 - Energy Performance of Buildings Directive — EPBD //EN L 153/13, 19.05.2010, p. 23.

2. Nematoucha M.K, Marie-Reine Nishimwe A., Reiter S. Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
3. Fedorczyk-Cisak M., Knap K., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Pekarchuk O. Energy and Cost Analysis of Adapting an Existing Building to 2017 Technical Requirements and Requirements for NZEB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 471, Issue 11, 24 February 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112094
4. DBN V.2.6-31:2006. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsia budivel. [Na zaminu SNiP II-3-79 ; chunnyi vid 2007.04.01 zi Zminou №1 vid 1 lypnia 2013 roku]. K.: Minbud Ukrainy, 2006. 70 s.
5. DBN V.2.6-31:2016. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsia budivel. [chunnyi vid 08.10.2016]. K.: «Ukrarhbudinform», 2006. 70 s.
6. Deshko V., Bilous I., Buiak N. Vplyv pereryvchastykh rezhymiv opalennia na dynamiku enerhopotreby ta umovy komfortnosti budivel z riznym rivnem teplovoho zakhystu. [Influence of intermittent heating modes on the dynamics of energy consumption and comfort conditions of buildings with different levels of thermal protection] *Naukovi visti NTUU KPI*. 2019. №4. S. 7-16.
7. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrahunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittleni ta hariachomu vodopostachanni / DSTU B A.2.2-12:2015 [Natsionalnyi standart Ukrainy] – K.: Minrehion Ukrainy, 2015, - 203 s.
8. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub I.O. MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF SPECIFIC ENERGY NEED FOR HEATING USED IN UKRAINE. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2018. No.1. Pp. 13-25.
9. DSTU B EN ISO 13790:2011. Enerhoefektyvnist budivel. Rozrakhunok enerhospozhyvannia pry opalenni ta okholodzhenni (EN ISO 13790:2008, IDT). [Na zaminu HOST 26629.85; chunnyi z 01.01.2013]. K. : NDIBK, 2011. 229 s.
10. EN ISO 13786:2007. Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. — CEN. European Committee for Standardization, 2007. 27 p.
11. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 27–41.
12. RETScreen - Clean Energy Management Software [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>
13. International Weather for Energy Calculations: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.
14. DSTU -N B V.1.1-27:2010. Budivelna klimatologia. K., 2011. 127 s.
15. Deshko V.I., Bilous I.Iu., Hetmanchuk H.O. Bazy klimatologii dlia vyznachennia enerhetychnykh kharakterystyk budivel. [Climatology bases for determining the energy performance of buildings] *Naukovyi zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tekhnologii, ekolohiia»*. Vypusk №4 Kyiv 2017. S 67-73.

Надійшла 18.11.2020
Received 18.11.2020

І.І. Пуховий, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-4915-9699
М.А. Махров, магістр, асп., ORCID 0000-0003-0818-4433
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА ЗАХИСТУ ВІКОН ВІД СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ОДНОЧАСНИМ ОТРИМАННЯМ ВОДИ ДЛЯ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Проблеми. Влітку вікна пропускають у приміщення велику кількість сонячної енергії, що спричинює додаткові витрати на охолодження повітря за допомогою кондиціонування. Відомо, що межею комфорту є температура 26°C. Для зниження температури використовуються кондиціонери, яким на 10 м² житла потрібно 0,3 ... 0,5 кВт електричної потужності. Дослідження стосується захоплення сонячної енергії водою та використання її для побутових водних потреб (ГВП).

Мета дослідження. Експериментальна перевірка запатентованих розробок та розрахунки кількості гарячої води, що отримується на добу, економії енергії та економічних показників.

Методи реалізації. Експерименти проводились на південному вікні кімнати, з перекачуванням води насосом та періодичним вимірюванням температури повітря та води на виході з системи ртутним термометром. Розрахунки проводились із використанням методів, розроблених авторами. Дослідження проводились протягом трьох днів листопада. Температура всередині коливалася в приміщенні від 19 до 23 ° С. Система працювала в циркуляційному режимі на резервуарі для водної батареї, розташованому під поглиначем. Ізоляція поглинача з боку кімнати була зроблена з прозорої харчової плівки.

Результати досліджень. Температура води досягала 45 ° С за 1,5-2 години. Споживання води посилюється завдяки ефекту термосифона, коли вода рухається знизу вгору. У ясний день весни та осені ви можете нагріти на 50-70% більше води, ніж середній за середній день місяців теплої пори року. Для приготування гарячої води з 1 м² поглинача можна отримати 45-50 кВт · год тепла за кожен місяць з березня по вересень, беручи до уваги хмарність. Підраховано економію від використання гарячої води та від зменшення споживання електроенергії в кондиціонері.

Висновки. Термін окупності системи, враховуючи вартість тепла для ГВП та економію електроенергії для електричного кондиціонера, становить приблизно 4-5 років. Вартість системи близька до вартості домашнього кондиціонера для приміщення з єдиним вікном, орієнтованим на південь. Щодо фактору енергозбереження, додатковою перевагою є екологічність системи порівняно з кондиціонером.

Ключові слова: захист від перегріву приміщень; охолодження повітря; побутове водопостачання; енергоефективність; сонячна радіація; енергозбереження; збереження навколишнього середовища.

Вступ

Вікна влітку пропускають велику кількість сонячної енергії в приміщення. Що викликає додаткові затрати на охолодження повітря, шляхом кондиціонування. Відомо, що межею комфорту є температура 26°C. Для зниження температури використовують кондиціонери, які на 10 м² оселі, потребують 0,3...0,5 кВт електричної потужності. В пасивних будівлях, де на опалення витрачають 15-70 кВт·год/м² площі будівлі за рік, вікна роблять менших розмірів, а охолодження повітря влітку забезпечують ґрунтовими теплообмінниками, розташованими в фундаменті або поряд в ґрунті на глибині, де він має температуру біля 10°C. На кондиціонування повітря при цьому витрачається електроенергія (для вентиляторів), причому її питома витрата близька до згаданої на опалення. Остання може бути дешевшою при спалюванні, наприклад, дешевої біомаси, тощо. Основна кількість теплоти у приміщення, в теплий сезон, передається через вікна, а особливо страждають від перегрівання приміщення з вікнами на південно-західних та західних фасадах, коли Сонце опускається нижче, а атмосферне повітря вже прогріте.

З проникненням сонячних променів через скло борються різними методами. В малоповерхових будівлях перед вікнами саджають дерева, які після скидання листя, з листопада по квітень, пропускають через оголені гілки сонячне проміння, сприяючи системі опалення. При наявності закслених буферних зон пасивних систем сонячного опалення (веранди, лоджії, огорожі стіни Тромба-Мішеля, тощо) забезпечують провітрювання для відводу теплоти в атмосферу. Є також можливість затінити закслені поверхні навісними непрозорими огорожами [1], які ще називають «маркізи». Крім того, вікна закривають ролетами

© І.І. Пуховий, М.А. Махров, 2020

віконницями та іншими архітектурними деталями, типу дашків чи лоджій [2].

Для багатопверхових сучасних будівель зовнішні засоби, типу тентів чи ролет мало підходять через складність обслуговування. Світловідбиваючі плівки досить дорогі, зменшують рівень освітлення, складні для монтажу та демонтажу.

Перераховані вище методи захисту від сонячних променів абсолютно не використовують корисно сонячну енергію, що падає на зашклену поверхню. Але є розробка [3] вчених з Гарварда, в якій пропонується на віконне скло накладати пластину із силіконового каучуку, в якому виконані канали малого перерізу для проходження води, яка після нагрівання може бути використана для ГВП. Дана задумка є раціональним рішенням корисного використання енергії сонячного випромінювання, але її виконання, на жаль, не дає змоги отримати достатню кількість води для її побутового використання.

На сьогодні існує немало схем підігріву води для забезпечення можливості її постачання для цілей ГВП. Досить розповсюдженими в плані практичного застосування є сонячні колектори та геліосистеми. Наприклад, системи фотоелектричного гарячого водопостачання (геліосистеми): використовують електричну енергію, що виробляється фотоелектричними панелями, для безпосереднього нагріву води ГВП та опалення [4]. Останні можуть працювати майже увесь рік (за умов достатньої сонячної активності) та складаються із фотоелектричних модулів, бойлера та контролера. Швидко монтуються, легкі в інтеграції до наявної системи ГВП, майже не вимагають обслуговування та можуть робити в автономному режимі. Сонячні колектори, поділяються на два основних типи: плоскі та вакуумні [5]. Плоский – є пристроєм, в металевій рамі якого знаходиться абсорбер із селективним покриттям та припаяними до нього трубками, через які циркулює вода. Вакуумний, у свою чергу, за конструкцією нагадує термос – всередині кожної трубки, є трубка меншого діаметру, а вакуум між ними відіграє роль теплоізолятора. Вакуумні більш ефективно нагрівають воду взимку та при похмурих днях (в порівнянні із плоскими ККД вище на 20%), а плоскі краще себе проявляють в теплий період, коли є значна кількість ясних днів (в ясну погоду його ККД вищий від вакуумного на 10%). Обидві системи розміщують на дахах будівель, для забезпечення максимального контакту із сонячним випромінюванням та зменшення використання «ефективної» площі, яка є в наявності.

Незважаючи на те, наскільки добре себе зарекомендували описані вище системи підігріву води за допомогою сонячного випромінювання, вони не вирішують ніяким чином задачі по запобіганню перегріванню приміщень, на будівлях яких встановлені. Тому було прийнято рішення об'єднати ці дві задачі: запобіганню перегріванню приміщень в теплий період року та нагрівання води для цілей ГВП – в одній системі.

Нами отримані два патенти України на корисну модель, в яких запропоновано використання для охолодження вікон теплообмінника-абсорбера з різних матеріалів, в тому числі, із полікарбонату, який має сотову структуру каналів прямокутного перерізу для пропускання води. В корисній моделі [6] встановлюють бак-акумулятор води, розміщений біля нижньої частини огорожі, воду до якого подають насосом. Абсорбер з'єднується із вхідним та вихідним колекторами. Кріплення абсорбера реалізовано у вигляді вертикально або горизонтально рухомих пластин, які закріплюють із внутрішньої сторони приміщення біля зашкленних отворів на певній відстані від них.

Полегшення монтажу/демонтажу абсорбера біля скла відбувається, у зв'язку із низькою вагою елементів системи та наявністю вільного доступу до місця встановлення в будь-який час. Вертикальні або горизонтальні рухомі частини абсорбера, виконують обертовими, а приєднання циркуляційної лінії суміщають з осями обертання. При необхідності пропускання всього світла, частини абсорбера можна відхилити до стелі, в сторони, при малій ширині вікон та повертати навколо осі, що проходить через середину ширини абсорбера (при великій ширині вікон).

В [7] абсорбер виготовляють з прозорого матеріалу, за ним встановлюють прозору теплоізоляцію, а бак-акумулятор розміщують вище вікон для забезпечення вільної конвекції. Відстань між верхівкою абсорбера і прозорою верхівкою вікна вибирають близькою розміру тіні від перекриття над вікном при найбільшій висоті Сонця, причому для збільшення висоти тіні використовують непрозорий дашок над вікном. Абсорбер з прозорою теплоізоляцією встановлюють на весь теплий період, коли потрібен захист від перегрівання приміщення. Світло проходить через прозорі абсорбер і теплоізоляцію (наприклад, два шари поліетиленової плівки або додатковий лист полікарбонату), та відкриту верхню частину вікна. Період використання системи в північній півкулі Землі з травня по жовтень (в інші місяці, в деяких місцевостях, для ГВП система малоефективна через високу хмарність). Абсорбер можна взимку не знімати для зменшення теплових втрат через вікна. При цьому воду зливають або залишають, якщо приміщення постійно опалюється.

Мета та завдання. Задачею даної роботи є експериментальне дослідження охолоджуваного водою абсорбера; моделювання гідравлічного опору конструкції абсорбера; розрахунки отриманої за день кількості гарячої води, економії енергії та економічних показників.

Дослідження інноваційної системи захисту від перегрівання приміщень влітку з отриманням води для ГВП

Дослідний абсорбер (Рис.1) виконаний із сотового полікарбонату і має площу 0,33725 м². Висота і ширина абсорбера, відповідно, 950 мм і 355 мм. Абсорбер обладнаний двома гідравлічними колекторами.

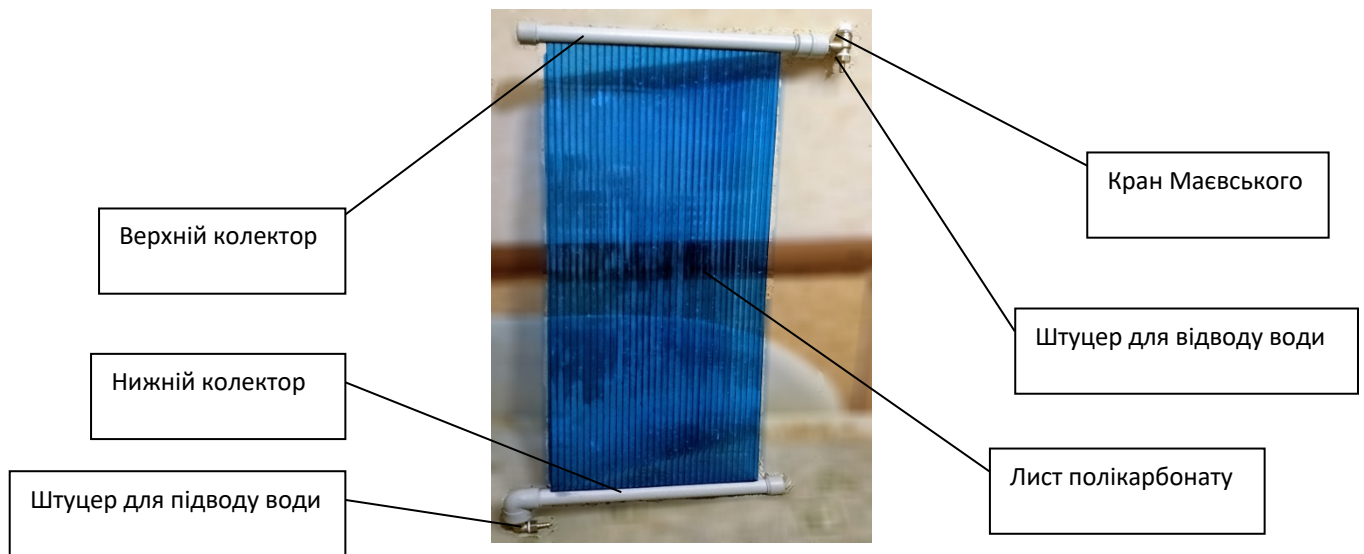


Рисунок 1 – Абсорбер з приєднаними до нього колекторами

Розрахунки показують, що з нього можливо отримати близько 100 Вт теплоти і нагріти за 5 годин інсоляції 15...20 кг води від 20 до 40...50°C. В офісах цієї води достатньо для миття рук 10 співробітникам, а в житлових будинках води буде достатньо для миття посуду і душу для одного жителя.

Систему експериментально перевірено на протязі трьох ясний днів (м. Київ; 7,8 та 9 листопада; температура повітря в доквіллі 10,5 °C у середньому; подвійне застеклення вікна). На вікні, орієнтованому на Південь встановлений абсорбер, обладнаний нижнім і верхнім колекторами та циркуляційною лінією з насосом від омивача скла автомобіля. Насос можна живити електроенергією від сонячної панелі, площею 0,2 – 0,4 м². Сонячне випромінювання змінюється дуже повільно протягом місяця, і оскільки, дослідження проводилися три дні підряд, то було прийнято допущення, що сонячна радіація стала в цей період.

При заповненні абсорбера водою, за допомогою подачі насосом, витрата складала 460 мл/хв. Та, при організації замкнутого циркуляційного контуру через посудину, розміщену нижче абсорбера, витрата зросла до 730 мл/хв, за рахунок природної циркуляції викликаної термосифонним ефектом під час сонячного освітлення поверхні абсорберу.

Температура в приміщенні коливалася від 19 до 23 °C. Встановлене ущільнення простору між склом та абсорбером для попередження доступу повітря та ізоляція бака-акумулятора. Система працювала у циркуляційному режимі на бак-акумулятор розташований під абсорбером. Ізоляція абсорбера зі сторони кімнати була виконана з прозорої харчової плівки. Періодично фіксувалися температури повітря в кімнаті та температури води на виході із системи (Рис. 2).

Видно, що при застосуванні ізоляції, можливо досягти вищої температури води на виході із системи на 5...7 °C (або навіть 10 °C – за умови хорошої ізоляції). Встановлення певного шару ізоляції абсорбера зі сторони приміщення запобігає підігріванню повітря в приміщенні, що сприяє підтриманню комфортної температури.

Вдалося підігріти воду від 20 °C до 43 °C за півтори години. Аналізуючи варіанти покращення теплоізоляції можливо досягти температури води на виході, вище 50 °C.

Комп'ютерне моделювання гідравлічного опору експериментального абсорбера із гідравлічними колекторами.

В [8] запропоновано організувати природну циркуляцію шляхом розміщення бака-акумулятора над вікном. В умовах приміщення існують проблеми з організацією достатнього напору через обмеження висоти розташування бака – вона тим більша, чим вищий гідравлічний опір абсорбера.

За допомогою САПР SolidWorks проведено дослідження гідравлічних втрат при використанні полікарбонату в якості абсорбера сонячного випромінювання. Змінювалася конструкція верхнього та нижнього гідравлічних колекторів. Геометричні розміри експериментального абсорбера стали – висота і ширина абсорбера, відповідно, 950 мм і 355 мм.

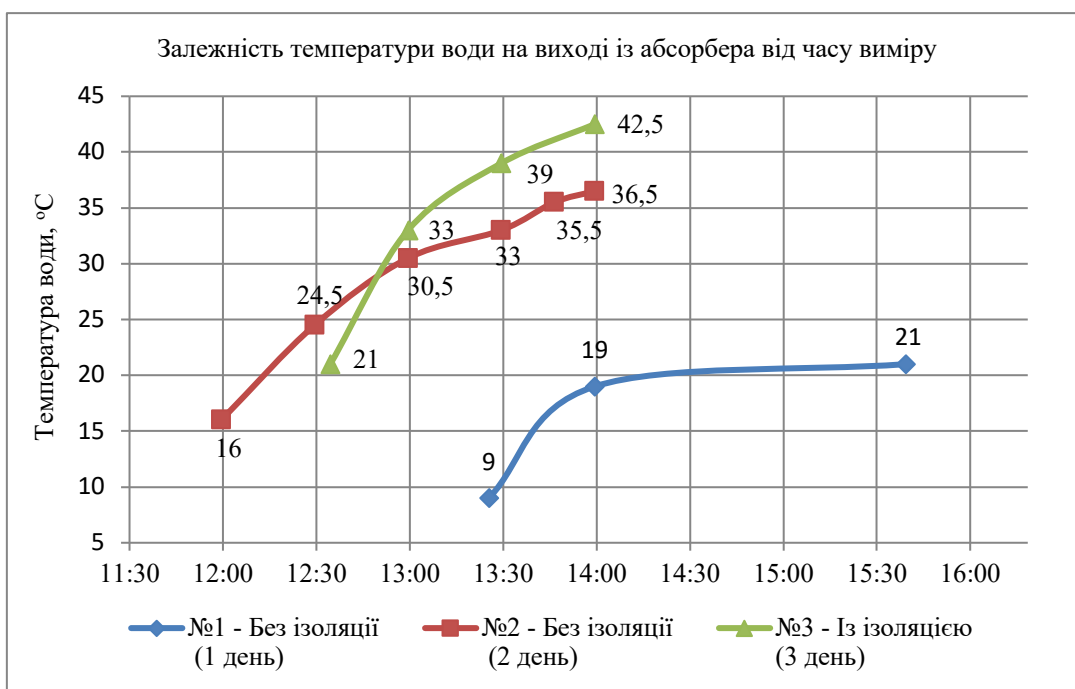


Рисунок 2 – Температура води на виході з абсорбера в залежності від часу

Метою дослідження було визначити величину гідравлічних втрат в системі, її залежність від розміру та типу колекторів і пошуком їх оптимальних параметрів, при яких досягається мінімальна втрата тиску. Для цього в САПР були створені моделі системи з колекторами різних розмірів та форм перерізу.

Для дослідження змодельовані гідравлічні колектори круглого перерізу із внутрішніми діаметрами 20, 28 та 36 мм, квадратного перерізу із внутрішніми розмірами 20x20 мм, 28x28мм та прямокутного перерізу із внутрішніми розмірами 28x10 мм (ширина відповідає товщині абсорбера). Також, була задана температура води 20 °С та витрата 560 мл/хв, що відповідає характеристикам реальної системи.

Результати дослідження гідравлічних втрат системи при застосуванні гідравлічних колекторів круглого перерізу наведені в табл.1.

Таблиця 1– Гідравлічні втрати в експериментальному прототипі з колекторами круглого перерізу

Діаметр колектора, мм	20	28	36
Гідравлічні втрати, Па	9465	10369	11701

Як видно з наведених даних, мінімальні втрати тиску досягаються при застосуванні колектору круглого перерізу найменшого діаметру, що дозволяє зменшити, як місцеві гідравлічні втрати, так і лінійні втрати. В порівнянні з базовим варіантом (внутрішній діаметр 28 мм) круглий колектор внутрішнім діаметром 20 мм забезпечує гідравлічні втрати, величина яких зменшується майже на 1 кПа. Використання колекторів більшого діаметру призводить до збільшення гідравлічних втрат та вартості системи в цілому, тому є недоцільним.

Дослідження моделі з колекторами квадратного та прямокутного перерізу показали незначні відмінності по гідравлічним втратам: 9516 Па – для колектору внутрішнього перерізу 28x28 мм, 9742 Па – для колектору перерізу 20x20 мм та 9851 Па – для колектору прямокутного перерізу 28x10 мм. Таким чином зміна розмірів колектору прямокутного перерізу значно не впливає на величину гідравлічних втрат в системі.

Отже, оптимальне значення гідравлічних втрат досягається при використанні колекторів круглого перерізу з мінімальним діаметром.

Розрахунки кількості води, яку можна отримати за день використання системи.

Було розглянуто ясний та середньостатистичний день, кожного місяця, з врахуванням можливої хмарності. Для ясного дня взяті значення енергії, що падає на вертикальний фасад. Для випадку можливого затінення фасаду наведена кількість енергії, що поступила на певну годину дня. Зауважимо, що після 12-ї години отримуємо майже стільки ж енергії, як і до 12 години (табл.2)

Таблиця 2– Миттєва інтенсивність сонячного випромінювання I, Вт/м² та максимальна кількість енергії E_m, Вт·год/м²·день, що падає на вертикальний фасад при безхмарному небі (широта 49 град.)

Година дня Місяць року	I, Вт/м ²				E _m , Вт·год/м ² ·день
	8	10	12	3 12 до 18	Всього за день
Червень	242	793	1664	1884	3313
Липень, Травень	240	840	1792	1792	3573
Серпень, Квітень	252	1027	2175	2175	4351
Вересень, Березень	274	1220	2007	2007	5213

Нами проведені розрахунки із урахуванням E_m та хмарності за перевіреною методикою [9, 10] при нагріванні води з 15 до 45 °С та ККД колектора 0,5 (Рис. 3). ККД колектора може досягати 0,6 в літні місяці і 0,4 у весняні та осінні місяці.

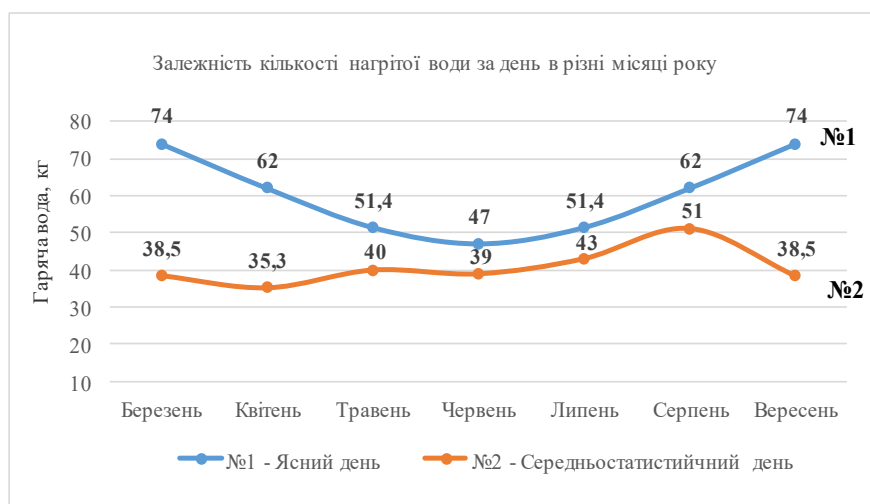


Рисунок 3 – Залежність кількості нагрітої води за день в різні місяці року.

Як видно з рис. 3, в літні місяці продуктивність по гарячій воді в ясний і середньо-статистичний день майже однакова, але весною і восени спостерігається велика розбіжність результатів.

При врахуванні хмарності кількість води (отриманої енергії) різко зростає в серпні за рахунок малої хмарності та висоти положення Сонця. Високі значення маси нагрітої води в ясні дні березня, вересня і сусідніх місяців пояснюються падінням сонячних променів під кутами до вертикальних вікон, близькими до 90 градусів.

При площі абсорбера біля 4 м² (вікно 2x2м – типове вікно) за день можна отримати біля 120-250 кг води в середньо-статистичний день. Воду, нагріту біля вікон, можна використовувати для цілей ГВП або для басейну. Крім того, за кожний місяць, з травня по вересень буде збережено на 1 м² – 5...50 кВт·год енергії, або в середньому 250 кВт·год за сезон. На 4 м² – біля 100 кВт·год (в середньому, за той же період, з травня по вересень). Орієнтовна еквівалентна вартість даної кількості енергії, що не спожита електричним нагріванням води (станом на 2020 р.), приблизно дорівнює 80 євро.

З точки зору захисту приміщення від перегрівання, слід розглянути кількість енергії, що не поступила в приміщення завдяки її поглинання водою. Для цього розрахуємо кількість води з травня по вересень з урахуванням хмарності та теплоємності води, через різницю температур (45-15) градусів, знайдемо кількість акумульованої енергії. Результати розрахунку показують, що за всі згадані місяці на 1 м² вікна нагрівається близько 6300 кг води, і в електричному кондиціонері не витрачається біля 75 кВт·год електроенергії при холодильному коефіцієнті $e = 3$ і 55 кВт·год при $e = 4$.

Відповідно, найменша економія електроенергії при площі вікна 4 м² складе близько 200 кВт·год, або 400 грн (≈16 євро). Загальна економія на вікно складе ≈ 100 євро за сезон. Вартість виготовлення абсорбера з полікарбонату на 1 м² складає ≈ 150 євро, а при площі 4 м² система коштуватиме біля 550 євро, що приблизно дорівнює вартості кондиціонера, але при цьому вона витратиме в 40-50 разів менше електричної енергії на роботу.

Система може окупитися уже за 4-5 років при використанні теплоти в корисних цілях. При цьому, внаслідок зниження витрат електроенергії, зменшуються викиди парникових газів в атмосферу.

Висновки

1. Експериментально перевірений корисний ефект системи захисту приміщень від перегрівання через вікна з одночасним отриманням гарячої води для ГВП.
2. Витрата води через абсорбер, в порівнянні з продуктивністю насоса, зростає за рахунок термосифонного ефекту.
3. За даними моделювання, циркуляційний контур експериментального прототипу системи має гідравлічний опір, близько 10 кПа.
4. Мінімальна прозора теплоізоляція абсорбера підвищує температуру води на виході із системи, від 36 до 42 °С.
5. В ясні дні весни та осені можна нагріти на 50-70% води більше, ніж в середньому за середньостатистичний день місяця.
6. Для ГВП з 1 м² абсорбера можна отримати 45-50 кВт·год теплоти за кожен місяць з березня по вересень.
7. Насос споживає біля 15 Вт електроенергії, яку можна отримати при використанні фотоелектричної панелі, площею 0,2 – 0,4 м².
8. Строк окупності системи, із врахуванням вартості теплоти на ГВП і електроенергії для електричного кондиціонера, складає ≈ 4-5 років.

Список використаної літератури

1. Інтернет-ресурс «OKNA». Стаття «Вікна: захист від сонця».
URL: <https://okna.ua/ua/library/vikna-zakhyst-vid-sontsya> (дата звернення: 20.03.2021).
2. Інтернет-ресурс «SUNNY». Стаття «Захист на вікно від сонця: що краще вибрати?».
URL: <https://sunny-tm.com/uk/blog-headlines/articles/zashchita-na-okno-ot-solnca-cto-luchshe-vybrat> (дата звернення: 21.03.2021).
3. Benjamin D.Hattona, Ian Wheeldon, Matthew J.Hancock, Mathias Kolle, Joanna Aizenberg, Donald E.Ingber «An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows». – Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 117, October 2013, Pages 429-436.
4. Інтернет-ресурс «Atmosfera». Стаття «Фотоелектричне гаряче водопостачання».
URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/rishennya/sistemi-fotoelektrichnogo-garyachogo-vodopostachannya/> (дата звернення: 22.03.2021).
5. Інтернет-ресурс «Solensy». Стаття «Сонячний водонагрів».
URL: <https://solensy.com.ua/solar-water-heating/> (дата звернення: 22.03.2021).
6. Пуховий І.І., Махров М.А. Спосіб захисту від перегрівання і використання пасивної системи сонячного опалення та вікон для гарячого водопостачання влітку, Пат. України на к. м. № 118236. Опубліковано: 25.07.2017, МПК: F24J 2/42.
7. Пуховий І.І., Махров М.А. Спосіб захисту від перегрівання і використання вікон для гарячого водопостачання влітку, Пат. України на к. м. № 135091. Опубліковано: 10.06.2019, МПК: F24S 20/00, F24D 17/00, F25B 35/00.
8. Пуховий І.І., Махров М.А. Система захисту від перегрівання приміщень влітку через вікна та вітражі пасивних систем сонячного опалення. Тези XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» м. Київ, 24-27 квітня 2018 року – «Політехніка».- 2018. – Т.1. - с.200.
9. Пуховий І.І., Новаківський Є.В. Енергія, отримана від сонячного випромінювання в різних кліматично-географічних зонах України з урахуванням хмарності та її залежність від орієнтації сонячних колекторів // Відновлювальна енергетика. – 2006. - № 4. – с. 28 – 36.
10. Пуховий І.І., Новаківський Є.В. Коефіцієнти орієнтації сонячних колекторів по відношенню до південного напрямку в залежності від орієнтації для умов України. Наукові вісті НТУУ КПІ.- 2012.- № 1.- с. 15-21.

I. Puhoviy, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0003-4915-9699

M. Makhrov, Msc, PhD. Student, **ORCID** 0000-0003-0818-4433

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SOLAR RADIATION PROTECTION SYSTEM WITH SIMULTANEOUS HOT WATER SUPPLY

Problems. Windows in the summer let through a large amount of solar energy into the room, which causes an additional cost of cooling the air by conditioning. It is known that the limit of comfort is the temperature of 26 °С. To reduce the temperature, use air conditioners, which are required 0,3...0,5 kW of electrical power for 10 m²

of housing. The study deals with the capture of solar energy by water and its use for domestic water purposes (DHW).

The goal of the research. Experimental verification of patented developments and calculations of hot water quantity obtained per day, energy savings and economic indicators.

Methods of implementation. Experiments were conducted on the south window of the room, with water pumping by a pump and periodic measurement of air and water temperatures at the outlet of the system by mercury thermometer. The calculations were performed using the methods developed by the authors. The studies were conducted within three days of November. The temperature inside ranged a room from 19 to 23 °C. The system was operated in circulating mode on a water battery tank located below the absorber. Isolation of the absorber from the side of the room was made of a transparent food film.

Research results. Water temperature reached 45 °C per 1,5-2 hours. Water consumption is enhanced by the thermosiphon effect when water moves from the bottom up. On a clear day of spring and autumn, you can heat for 50-70 % more water than the average for the average day of months of the warm season. For preparing DHW with 1 m² of absorber, it is possible to get 45-50 kW·h of heat for each month from March to September, taking into account cloudiness. The savings from the use of hot water and from reducing the consumption of electricity in the air conditioner are calculated.

Conclusions. The payback period of the system, taking into account the cost of the heat for DHW and electricity savings for an electric air conditioner, is approximately 4-5 years. The cost of the system is close to the cost of a home air conditioner, for a premise with a single window oriented south. To the energy-saving factor, an additional advantage is the environmental friendliness of the system compared to the air conditioner.

Keywords: protection against overheating of premises; cooling of air; domestic water supply; energy efficiency; solar radiation; energy saving; conservation of the environment.

REFERENCES

1. Web-source «OKNA.ua». Article «Windows: Sun protection». URL: <https://okna.ua/ua/library/vikna-zakhyst-vid-sontsya> (refresh date: 20.03.2021).
2. Web-source «SUNNY». Article «Sun protection on the window: what is better to choose?». URL: <https://sunny-tm.com/uk/blog-headlines/articles/zashchita-na-okno-ot-solnca-chto-luchshe-vybrat> (refresh date: 21.03.2021).
3. Benjamin D.Hattona, Ian Wheeldon, Matthew J.Hancock, Mathias Kolle, Joanna Aizenberg, Donald E.Ingber «An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows». – Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 117, October 2013, pp. 429-436.
4. Web-source «Atmosfera». Article «Photoelectric hot water supply». URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/rishennya/sistemi-fotoelektrichnogo-garyachogo-vodopostachannya/> (refresh date: 22.03.2021).
5. Web-source «Solency». Article «Solar water heating». URL: <https://solensy.com.ua/solar-water-heating/> (refresh date: 22.03.2021).
6. Puhoviy I., Makhrov M. Method of protection against overheating and use of passive solar heating system and windows for hot water supply in summer, Stalemate. Of Ukraine on k. M. № 118236. Published: 25.07.2017, IPC: F24J 2/42.
7. Puhoviy I., Makhrov M. Method of protection against overheating and use of windows for hot water supply in summer, Stalemate. Of Ukraine on k. M. № 135091. Published: 10.06.2019, IPC: F24S 20/00, F24D 17/00, F25B 35/00.
8. Puhoviy I., Makhrov M. System of protection against overheating of rooms in the summer through windows and stained-glass windows of passive systems of solar heating. Abstracts of the XVI International Scientific and Practical Conference of Postgraduates, Undergraduates and Students "Modern Problems of Scientific Support of Energy" Kyiv, April 2018 – «Polytechnic». -2018. – T.1. – 200 p.
9. Puhoviy I., Novakivsky E. Energy obtained from solar radiation in different climatic and geographical zones of Ukraine, taking into account cloudiness and its dependence on the orientation of solar collectors // Renewable energy. – 2006. - № 4. – pp. 28 – 36 p.
10. Puhoviy I., Novakivsky E. Orientation coefficients of solar collectors in relation to the southern direction depending on the orientation for the conditions of Ukraine. Scientific news of NTUU KPI. -2012.- №1.- pp. 15-21.

Надійшла 22.11.2020
Received 22.11.2020

Ц. Цзянгоу, асп.

Г.Б. Варламов, д-р. техн. наук, проф. ORCID 000-0002-4818-2603

К.О. Романова, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-9738-3383

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Л. Сюсянг, канд. техн. наук, директор

Л. Джиганг, канд. техн. наук, заступник директора

Інститут енергетичних досліджень Академії наук провінції Шандунь (м. Цзинань, КНР)

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО КОНДЕНСАТОРА ПРИ ЗМІНІ ТЕРМІЧНОГО ОПОРУ ТРУБОК

У роботі проведено дослідження з використанням математичної моделі умов та особливостей процесів конденсації з впливом зміни внутрішнього та зовнішнього термічних опорів руху робочих тіл, що виникають під час забруднення ззовні та всередині металевих труб поверхонь теплообміну повітряного конденсатора водяної пари у складі потужної паротурбінної установки на ефективність процесів енергообміну конденсатора. Особливої уваги приділено вибору, деталізації та визначенню понад двадцяти основних параметрів, що характеризують роботу блоку прямого охолодження конденсаційної установки для літнього періоду, умовам протікання процесів теплопередачі між робочими тілами з врахуванням наявності оребрення зовнішньої поверхні еліптичних за формою трубок конденсатора. Проаналізовано результати експериментів на математичній моделі та визначено вплив швидкості набігаючого повітря та температури навколишнього середовища на вихідний тиск пари у системі прямого повітряного охолодження конденсатора у межах зміни внутрішнього та зовнішнього термічного опорів у діапазоні $0-0,001$ (м²·К)/Вт внаслідок забруднення охолоджувальних трубок повітряного конденсатора паротурбінної установки. Визначено умови, характер та особливості впливу теплового опору забруднення в трубках охолодження на тиск пари на виході з них, основні фактори, що визначають тиск пари на виході, обґрунтовано необхідність організації контролю термічного опору забруднення в трубі під час роботи агрегату при змінних умовах експлуатації та доцільність проведення тестових досліджень експлуатаційних режимів з одночасним врахуванням впливу термічного опору зовнішнього та внутрішнього забруднення на теплову ефективність агрегату охолодження. Дослідження показали, що при фіксованому значенні теплового навантаження вихлопної пари тиск виходу пари збільшується зі збільшенням температури навколишнього середовища та зменшенням швидкості набігаючого повітря.

Ключові слова: конденсатор, повітряне охолодження, еліптичні трубки, термічний опір, ефективність охолодження

Вступ

Системи охолодження потужних агрегатів енергоперетворення працюють з використанням різних робочих тіл, таких як вода, повітря, хладони, спирт, азот, гелій та ін. Вибір робочого тіла для кожної конкретної установки або агрегату визначається великою кількістю факторів, головними з яких є доступність, дешевизна, висока теплопровідність, висока теплоємність, не агресивність і не токсичність. Найбільш поширеними в енергетичних системах робочими тілами по задоволенню сукупності вимог є вода і повітря, хоча їх характеристики не в повній мірі відповідають комплексу інших теплотехнічних вимог.

Підбору робочих тіл для систем охолодження різних установок передують фундаментальні дослідження і узагальнення результатів для різних процесів передачі теплоти, в тому числі при кипінні, конденсації і випаровуванні різних робочих тіл. Наприклад, особливе місце в таких дослідженнях займають роботи з аналізом умов теплообміну (охолодження) в теплонапружених елементах установок з використанням криогенних рідин [1-3] та інших речовин [4-6]. Разом з тим, найбільш доступним робочим тілом з економічних, експлуатаційних умов та умов забезпечення безпеки під час експлуатації для систем охолодження в потужних енергетичних установках є повітря і вода [7,8].

Оскільки натурні випробування на реальному устаткуванні із забезпеченням необхідних режимів експлуатації потужних паротурбінних установок (ПТУ) є економічно недоцільними та неймовірно складними, більшість сучасних досліджень з визначенням впливу важливих елементів та їх комплексів на різні характеристики і властивості ПТУ здійснюються за допомогою математичних моделей з використанням сучасних програмних середовищ [9-10]. Такий підхід у проведенні досліджень дозволяє отримати комплексні результати та значення конкретних параметрів і величин, які можливо потім точно

© Ц. Цзянгоу, Г.Б. Варламов, К.О. Романова, Л. Сюсянг, Л. Джиганг, 2020

ідентифікувати існуючими методами [11]. У даній роботі здійснювалися дослідження на математичній моделі із допущенням, що енергоперетворюючі агрегати виготовляються з відомих за складом компонентів металів (сталей) зі своїми унікальними властивостями. Тому загальноприйняті в світовій практиці аналітичні залежності і закони тепловіддачі, теплопередачі і теплообміну можуть бути використані у повній мірі і мають можливість урахування певних особливостей. Для отримання адекватних для практичної реалізації результатів завжди необхідні додаткові дослідження властивостей і характеристик процесів теплообміну для конкретних видів матеріалів і типів систем охолодження.

У період роботи паротурбінної установки термічний опір охолоджувальних трубок конденсатора з безпосереднім повітряним охолодженням може впливати на її економічні характеристики, які доцільно враховувати під час техніко-економічних оцінок діяльності устаткування і підприємства в цілому.

Найбільш важливою відмінністю прямого охолоджуючого блоку від звичайного блоку мокрого охолодження є система холодного кінця [7,8]. Комплектуючі для систем охолодження повітряного конденсатора є основним обладнанням для теплообміну вихлопної пари та холодного джерела повітря прямого охолоджуючого пристрою, а його продуктивність теплопередачі безпосередньо впливає на теплову ефективність агрегату. Аналіз впливу зовнішнього теплового опору на тиск вихлопної пари в охолоджуючій трубі має певне опорне значення для визначення оптимального значення часу періодичності (циклу) очищення повітряного конденсатора та економічної роботи прямого охолоджуючого агрегату.

Мета та завдання

Робота присвячена визначенню якісних характеристик впливу забруднень на внутрішніх та зовнішніх поверхнях теплообміну на величину термічного опору охолоджуючих труб конденсатора паротурбінної установки потужністю 600 МВт, що обдуваються ззовні набігаючим навколишнім повітрям.

Відмінною особливістю даної роботи від інших досліджень є спроба врахувати вплив наявності різних відкладень на внутрішній і зовнішній поверхнях стінок трубок конденсатора і пучків охолоджуючих труб на процес конденсації пари і ефективність всієї установки.

Матеріал та результати досліджень

1. Математична модель термічного опору зовнішнього забруднення в трубі охолодження повітряного конденсатора

Теплообмін між вихлопною парою та повітрям прямого охолоджуючого агрегату здійснюється за допомогою пучків трубок охолодження конденсатора. В роботі досліджено характеристики впливу термічного опору внутрішнього та зовнішнього забруднення на тиск вихідної пари в трубках охолодження конденсатора при змінних робочих умовах.

1.1 Термічний опір забруднення всередині трубок охолодження

Коефіцієнт тепловіддачі K_0 трубки конденсатора охолодження повітря, виходячи із площі зовнішньої поверхні трубки, має вираз [12-14]:

$$\frac{1}{K_0 F_0} = \frac{1}{\alpha_i F_i} + \varepsilon_i \frac{1}{F_i} + \frac{\delta}{\lambda F_m} + \left[\frac{R_g + R_f}{F_0} \right] + \varepsilon_0 \frac{1}{F} + \frac{1}{\alpha_0 F}, \quad (1)$$

де F_0 – зовнішня поверхня охолоджуючої трубки, м²;

α_i – конвективний коефіцієнт тепловіддачі трубки охолодження, Вт/м²·К);

F_i – внутрішня поверхня трубки охолодження, м²;

ε_i – термічний опір трубки охолодження, м²·К/Вт;

δ – товщина стінки трубки охолодження, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності трубки охолодження, Вт/м·К;

F_m – площа трубки охолодження, м²;

R_g – термічний опір зазору, м²·К/Вт;

R_f – термічний опір оребрення, м²·К / Вт.

ε_0 – зовнішній термічний опір трубки охолодження, м²·К/Вт;

F – ефективна площа відведення теплоти оребрення, м²;

α_0 – конвективний коефіцієнт теплопередачі трубки охолодження, Вт/м²·К.

Тепловий потік через трубки охолодження з врахуванням теплопередачі самої трубки, термічного опору стінки трубки і термічного опору зазору і поверхні ребер можливо достатньо точно обчислити.

Величиною зміни тепловіддачі забруднення всередині трубки доцільно нехтувати за рахунок її незначної величини.

Таким чином дослідження впливу опору стінки трубки на втрату тиску рідини в самій трубці можливо дослідити з використанням формули (1), яка має вигляд:

$$\frac{1}{K_0 F_0} = \varepsilon_i \frac{1}{F_i} + \frac{1}{\alpha_0} \frac{1}{F} \quad (2)$$

Загальна передача теплоти Q_0 трубки охолодження у складі конденсатора становить [15]:

$$Q_0 = K_0 F_0 \Delta t_m \quad (3)$$

Середня різниця температур між паром та повітрям у процесі тепловіддачі в трубці охолодження, °С:

$$\Delta t_m = \varphi \Delta t_{lm} \quad (4)$$

де φ – поправочний коефіцієнт.

Логарифмічна середня різниця температур теплопередачі, °С:

$$\Delta t_{lm} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta t + \delta_t}{\delta_t}} \quad (5)$$

де: Δt – зміна температури повітря, °С;

δ_t – різниця кінцевих температур теплоносіїв, °С.

Повітря протікає між ребрами трубки охолодження при їх щільному розташуванні у повітряному конденсаторі, а пара проходить всередині трубки. Тому потік повітря і потік пари в повітряному конденсаторі є неоднозначними поперечними потоками, а поправочний коефіцієнт φ можна знайти відповідно до параметрів P, R [16]. Параметр P визначається як:

$$P = \frac{\Delta t}{t_{s1} - t_{a1}} \quad (6)$$

де: t_{s1} – температура пари на вході в конденсатор, °С;

t_{a1} – температура повітря на вході в конденсатор, °С.

Параметр R визначається як:

$$R = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\Delta t} \quad (7)$$

де t_{s2} – температура пари на виході з повітряного конденсатора, °С.

В даний час більшість труб охолодження повітряних конденсаторів прямого охолодження є еліптичними трубами з оребренням, як показано на рис. 1, які розташовуються вузькою стороною (параметр b) поперечно набігаючому потоку (рис.2).

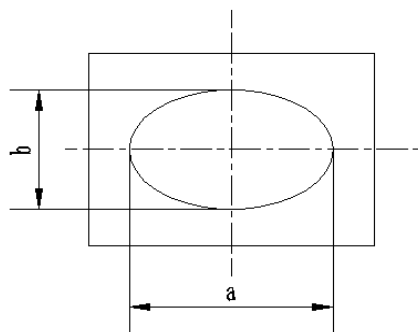


Рисунок 1 – Форма поперечного перерізу еліптичної за формою оребреної трубки: a, b-половина довжини довгої та короткої осі еліптичної трубки, м

Площа базової зовнішньої поверхні F_0 трубки з оребренням визначається за формулою:

$$F_0 = \pi l [1.5(a + b) - \sqrt{ab}] \quad (8)$$

де: l – довжина труби у повітряному конденсаторі, м;

n – загальна кількість трубок охолодження у конденсаторі.

Коефіцієнт ефективності передачі теплоти (NTU) визначається як відношення теплового потоку, коли різниця температур теплопередачі становить 1 К, до потоку теплоти, що поглинається або вивільняється при зміні температури 1 К рідини з малою теплоємністю, яка є параметром, що відображає труднощі процесу теплообміну між холодним та гарячим теплоносіями, а також є параметром для вимірювання величини теплопередачі теплообмінника в цілому [16]. NTU розраховується за формулою:

$$NTU = \frac{K_0 F_0}{\rho v_y A_y c_a}, \quad (9)$$

де ρ – середня щільність холодного та гарячого повітря, кг/м³;

v_y – швидкість повітря на поверхні трубки, м/с;

A_y – площа поверхні повітряної частини конденсатора, м²;

c_a – питома теплоємність повітря, Дж/кг·К.

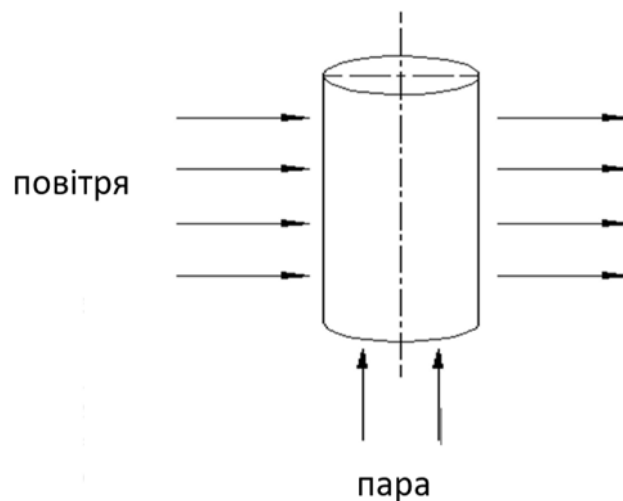


Рисунок 2 – Схема руху теплоносіїв у трубці конденсатора

Температура пари t_{s1} на вході у конденсатор:

$$t_{s1} = \frac{D_0(h_s - h_c)}{3600 A_y v_y \rho_a c_a} \times \frac{1}{1 - e^{-NTU}} + t_{a1}, \quad (10)$$

де D_0 – витрата водяної пари, кг/с;

h_s – питома ентальпія водяної пари на вході у конденсатор, Дж/кг;

h_c – питома ентальпія конденсату на виході з конденсатора, Дж/кг.

Тиск насиченої водяної пари $p(t_{s1})$, що відповідає температурі t_1 знаходиться з ентропійної діаграми водяної пари. Тиск пари на виході з трубки P_s можемо визначити з урахуванням падіння тиску на виході з трубки Δp_1 та різниці тиску від виходу прямого охолоджуючого пристрою до входу повітряного конденсатора до десятків метрів Δp_2 , тобто [17]:

$$P_s = p(t_{s1}) - \Delta p_1 - \Delta p_2. \quad (11)$$

Передбачається, що в робочих умовах термічний опір забруднення в трубці охолодження повітряного конденсатора щойно введеного в експлуатацію блоку становить $\varepsilon_1 = 0$ [18]. Як відомо, тиск P_s може змінюватися (зменшуватися) в залежності від умов експлуатації.

1.2. Зниження термічного опору поза трубою охолодження повітряного конденсатора.

У трубці охолодження повітряного конденсатора математична модель теплового опору зовнішнього забруднення в основному така ж, як і внутрішня. При тепловому опорі теплопровідності зниженням контактного теплового опору і змінами термічного опору нехтують, а зниження теплового опору в трубці виключається, тому формула (1) може бути такою:

$$\frac{1}{K_0 F_0} = \varepsilon_0 \frac{1}{F} + \frac{1}{\alpha_0 F}. \quad (12)$$

Формули (3) - (12) – математична модель змінного робочого стану зовнішнього термічного опору трубки охолодження.

2. Характеристики термічного опору забруднення в трубі охолодження повітряного конденсатора

Враховуючи, що конденсатор повітря розміщений у зовнішніх умовах, іноді виникає явище теплового звороту, що призведе до зниження ефективності тепловіддачі. На основі встановленої математичної моделі вибирається теплове навантаження вихлопних газів Q_0 агрегату як змінна характеристика робочого стану впливу термічного опору трубки охолодження та зовнішнього термічного опору на тиск вихлопної пари при різних температурах навколишнього середовища та швидкості повітря.

2.1 Забруднення і наявність термічного опору в трубі охолодження

Для прикладу узяті дослідження умов робочого стан блоку паротурбінної установки прямого охолодження потужністю 600 МВт (відповідні параметри наведені в таблиці 1) у літній період року. Температуру пари на вході в конденсатор повітря можна виразити так:

$$t_{s1} = 34.7159 \times \frac{1}{1 - e^{-\frac{0.00523345}{1.0099\epsilon_1 + 0.001739968}}} + 32 \cdot$$

Таким же чином можна отримати відповідну формулу функцій t_{s1} та ϵ_1 при будь-якому іншому робочому стані для визначення тиску вихлопної пари, що відповідає зміні термічного опору забруднення в трубі охолодження в межах 0 - 0,001 м²·К/Вт для різних умов стану навколишнього середовища, які можуть бути обчислені за рахунок застосування математичної моделі, а взаємозв'язок між ними показано на рисунках 3-5.

2.2 Зниження термічного опору зовнішньої сторони трубки охолодження

Для аналогічних параметрів, що наведені у таблиці 1 і застосуванням формули 10 визначається температура пари на вході повітряного конденсатора:

$$t_{s1} = 34.7159 \times \frac{1}{1 - e^{-\frac{0.00523345}{0.064737218\epsilon_0 + 0.001739968}}} + 32 \cdot$$

Криві зміни тиску пари на виході з трубки охолодження при зміні теплового опору зовнішнього забруднення трубки охолодження в діапазоні 0-0,001 м² · К / Вт, показано на рисунках 6-8.

Таблиця 1 – Основні параметри робочого стану блоку прямого охолодження для літнього періоду

Назва параметрів на вході	Значення	Назва параметрів на виході	Значення
Температура повітря на вході конденсатора, °С	32	Температура повітря на виході з повітряного конденсатора, °С	6.71
Тиск пари на вході у конденсатор, кПа	29.543	Тиск пари на виході з конденсатора, кПа	2.8.988
Температура пари на вході у конденсатор, °С	68.743	Температура пари на виході з конденсатора, °С	6.8.309
Середня температура пари, °С	68.526	Товщина стінки еліптичної трубки /мм	1.5
Розмір еліптичної трубки, мм·мм	21.6×16	Загальна кількість трубок у конденсаторі повітря, шт.	6.72
Кількість трубок у трубному пучку, шт	39	Коефіцієнт тепловіддачі K_0 літнього стану, Вт·(м ² К) ⁻¹	5.74.723
Довжина трубки охолодження, м	10	Загальна площа зовнішньої поверхні еліптичних трубок, м ²	1.77.085
Загальна площа внутрішньої поверхні еліптичних трубок, м ²	17.5.349	Загальна поверхня теплообміну повітряного конденсатора, м ²	1.4915
Ефективна площа трубок для відведення теплоти, м ²	18.38218	Кількість рядків еліптичної трубки	1
Різниця температур між парою та повітрям Δt_m , °С	11.565	Параметр P	0.94467
Коефіцієнт корекції ϕ	0.998	Параметр R	0.0125

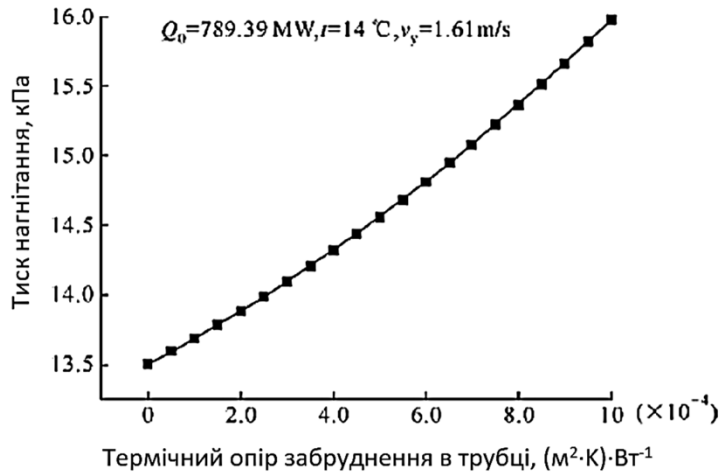


Рисунок 3 – Залежність тиску вихлопної пари від термічного опору забруднення у трубі при $Q_0 = 789,39$ МВт, $t = 14$ °C, $V_y = 1,61$ м/с

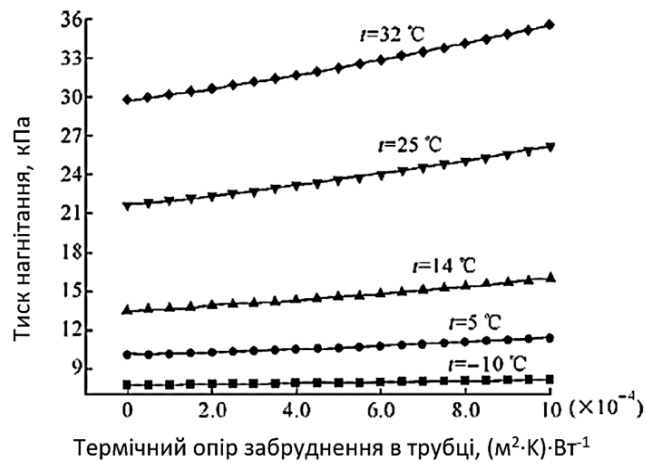


Рисунок 4 – Залежність тиску вихлопної пари з термічним опором в трубі при ($Q_0 = 789,39$ МВт, $V_y = 1,61$ м/с) для різних значень температури зовнішнього повітря

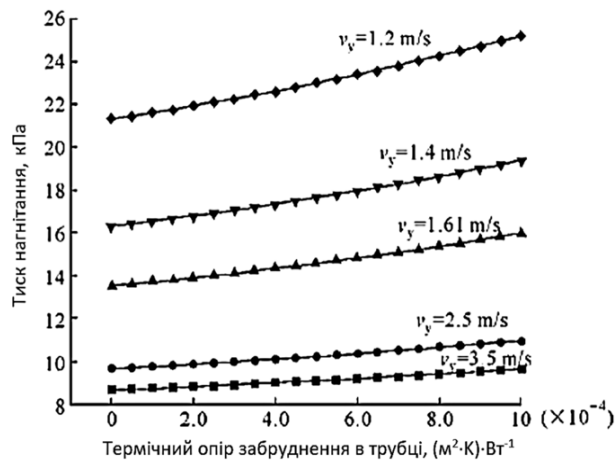


Рисунок 5 – Залежність тиску вихлопної пари з термічним опором в трубі від зміни швидкості набігаючого повітря ($Q_0 = 789,39$ МВт, $t = 14$ °C)

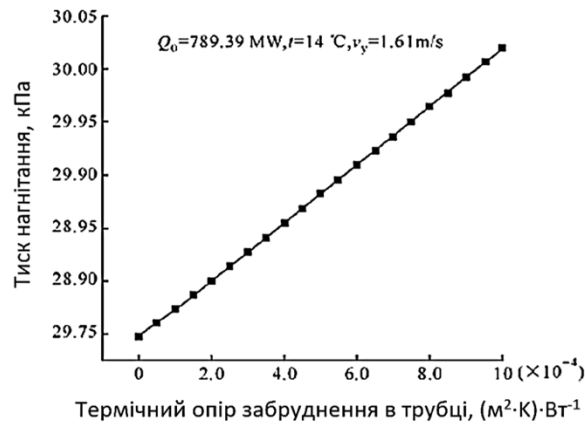


Рисунок 6 – Тиск вихлопної пари з термічним опором за межами труби при $Q_0 = 789,39 \text{ МВт}$, $t = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_y = 1,61 \text{ м/с}$

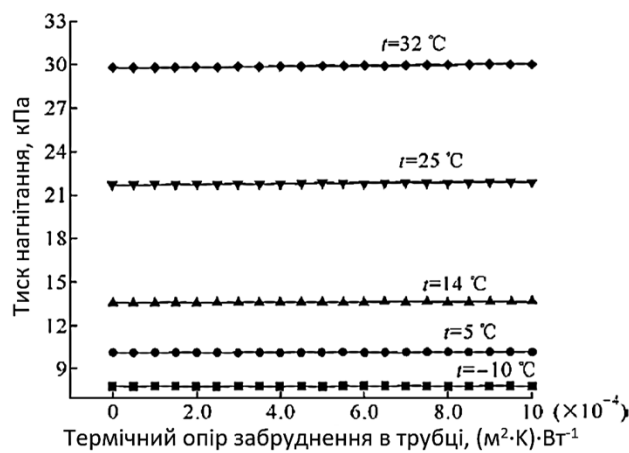


Рисунок 7 – Тиск вихлопної пари з термічним опором на зовнішній поверхні трубки ($Q_0 = 789,39 \text{ МВт}$, $V_y = 1,61 \text{ м/с}$)

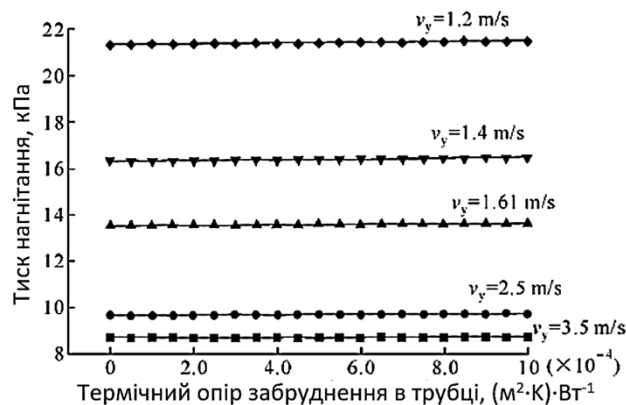


Рисунок 8 – Тиск вихлопної пари за межами труби з термічним опором на зовнішній поверхні трубки для різних швидкостей набігаючого повітря ($Q_0 = 789,39 \text{ МВт}$, $t = 14 \text{ }^\circ\text{C}$)

З рис.3 до рис. 8 видно, що вихідний тиск пари збільшується зі збільшенням термічного опору зовнішнього забруднення в трубі охолодження повітряного конденсатора, і зміна відносно лінійна.

Коли теплове навантаження вихлопної пари фіксується, якщо зовнішній термічний опір забруднення змінюється в певному діапазоні, тиск виходу пари збільшується зі збільшенням температури

навколишнього середовища та зменшенням швидкості навігаючого повітря. Чим вище температура навколишнього середовища і чим нижча швидкість навігаючого повітря, тим очевидніша зміна.

На рис.3 видно, що коли термічний опір забруднення в трубі коливається від 0 до 0,001 м²·К/Вт, вихідний тиск пари, що відповідає температурі навколишнього середовища 32 °С зростає приблизно на 5,819 кПа, а при температурі -10 °С вихідний тиск зменшується на 0,424 кПа.

На рис.4 видно, що коли тепловий опір забруднення коливається від 0 до 0,001 м²·К/Вт, тиск вихлопної пари, який відповідає швидкості повітря у межах 1,5 м/с і 3,5 м/с збільшується приблизно на 3,861 кПа і 0,956 кПа відповідно.

Вплив теплового опору зовнішнього забруднення на тиск вихлопної пари показано на рис.6-8. Якщо величини Q_0 , V_y , t_{a1} однакові, термічний опір забруднення в тій же кількості труб охолодження набагато більше, ніж зовні. Тепловий опір зовнішнього обпалення коливається від 0 до 0,001 м²·К/Вт, а тиск вихлопу збільшується приблизно на 5,819 кПа та 0,272 кПа зі збільшенням тиску вихлопу в трубі.

Зрозуміло, що дані дослідження дають можливість визначення якості різних впливів на ефективність експлуатації даного повітряного конденсатора, в якому застосовуються стандартні гладкостінні трубки.

В умовах застосуванні в агрегатах трубок іншої форми чи різних інтенсифікаторів, наприклад ямкових чи напівкільцевих виімок [19,20], потрібно буде застосовувати більш складні математичні моделі та програмні середовища, наприклад ПС Solid Works. Кількісні результати у цих випадках зміняться, але якісна картина має певну вірогідність залишитися без змін.

Висновки

1. Коли величини Q_0 , V_y , t_{a1} є постійними, крива зміни зовнішнього теплового опору між тиском вихлопної пари прямого охолоджуючого пристрою та трубкою охолодження повітряного конденсатора аналогічна прямій лінії. Коли величини Q_0 , V_y , t_{a1} є однаковими, вплив теплового опору забруднення в трубі охолодження на тиск вихлопної пари набагато більший, ніж зовнішній, тоді збільшення опору в трубі та конвективний коефіцієнт тепловіддачі назовні трубки є основними факторами, що визначають тиск вихлопу прямого охолоджуючого блоку. Вплив теплового опору зовнішнього забруднення на тиск вихлопної пари пов'язаний з V_y , t_{a1} . Чим вище t_{a1} , тим менше V_y , тим значніший ефект.

2. Після введення пристрою в експлуатацію протягом певного періоду часу в трубі повітряного конденсатора виникає забруднення і тепловий опір підвищується. Враховуючи, що можна використати водяний насос високого тиску для регулярного промивання зовнішньої поверхні трубок охолодження, що забезпечує мінімізацію забруднення на тепловий опору зовнішньої поверхні трубок, впливом якого на тиск вихлопної пари можна нехтувати при розрахунку відповідних теплових економічних параметрів блок прямого охолодження. Забруднення в трубі видалити відносно важко, і це має великий вплив на тиск вихлопу. Необхідно посилити нагляд і контроль термічного опору забруднення в трубі під час роботи агрегату при змінних умовах експлуатації.

3. Вплив зовнішнього теплового опору на тиск вихлопної пари в трубопроводі охолодження конденсатора моделюється та розраховується окремо, не враховуючи одночасно впливу термічного опору внутрішнього забруднення на теплову ефективність агрегату охолодження, який повинен далі вивчатися за допомогою збору даних тестового та експлуатаційного режимів експлуатації агрегату.

Список використаної літератури

1. Безродний М.К., Варламов Г.Б., Куделя П.П. Тепловіддача при вільній конвекції та кипінні води і хладону-12 на пластині в полі відцентрових сил. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». -1999. -№2. – С.26-31.
2. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. – Киев: Наукова думка, 1987. – 264с.
3. Бутузов А.И. и др. Экспериментальные данные по кипению фреона-12 и воды при свободном движении в условиях инерционных перегрузок. // Теплофизика высоких температур. -1969 (6) . - №3. – С. 490-494.
4. Калимуллина Д.Д., Гафуров А.М. Новые системы охлаждения конденсаторов паровых турбин ТЭС. // Международный научный журнал «Инновационная наука» . – №3/2016. – С.100-101.
5. Гафуров А.М., Гафуров Н.М. Замещение воздушного охлаждения конденсаторов паровых турбин контуром циркуляции на CO₂. // Инновационная наука. – 2016. – № 1-2 (13) . – С. 27-29.
6. Гафуров А.М., Гафуров Н.М. Замещение воздушного охлаждения конденсаторов паровых турбин контуром циркуляции на C₃H₈. // Инновационная наука. – 2016. – № 1-2 (13) . – С. 29-31.
7. Ding Ermou. Air cooling technology in power plant. – Beijing: Water Conservancy and Electric Power Publishing House, 1992.– 218 p.
8. E. S. Millias. Air-cooled power plant . – Beijing: Machinery Industry Press, 1986.– 186 p.

9. Гуреев В.М., Ермаков А.М., Мисбахов Р.Ш., Москаленко Н.И. Численное моделирование кожухотрубного теплообменного аппарата с кольцевыми и полукольцевыми выемками. // Промышленная энергетика. – 2014. – № 11. – С. 13-16.

10. Москаленко Н.И., Мисбахов Р.Ш., Ермаков А.М., Гуреев В.М. Моделирование процессов теплообмена и гидродинамики в кожухотрубном теплообменном аппарате. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 11-12. – С. 75-80.

11. Варламов Г.Б., Приймак К.О., Оліневич Н.В., Очеретянюк М.Д. Features of integrated energy assessment of the actual environmental performance of energy facilities. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи – 2015 – №4/2015(32). – С. 75-81.

12. Yan Junjie, Zhang Chunyu. Theoretical study on the characteristics of direct air cooling system under variable operating conditions. // Thermal Power Engineering.–2000 (6), 601-603pp.

13. Zhang Chunyu. Study on Economic diagnosis theory of air cooling unit operation in thermal power plant . – Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.– 240 p.

14. Yan Junjie, Zhang Chunyu. Study on economic diagnosis theory of direct air cooling unit. // Journal of Test Technology, North China Institute of Technology.–2000 (1), 1-6pp.

15. Yang Shiming. Heat transfer .– Beijing: Higher Education Press, 1998.– 170 p.

16. Zhu Xiuguan. Principle and calculation of heat exchanger.– Beijing: Tsinghua University Press. – 1987, 346-348pp.

17. Zhou Lanxin, Yang Jing, Yang Xiangliang. Study on variable operating condition characteristics of 600MW direct cooling unit . // Power Engineering. – 2007 (6), 623-627pp.

18. Gardner David, Fontes Roger, Casey, Richard. Bundling advanced technologies to achieve maximum efficiency and environmental acceptability in a modern coal-fired power plant. // Proceedings of the 2003 International Joint Power Generation Conference. – 2003, 1011-1029pp.

19. Гуреев В.М., Мисбахов Р.Ш., Ермаков А.М., Москаленко Н.И. Повышение эффективности кожухотрубных теплообменных аппаратов с применением луночных и полукольцевых выемок. // Энергетика Татарстана. – 2014. – № 3-4 (35-36) . – С. 61-64.

20. Мисбахов Р.Ш., Москаленко Н.И., Ермаков А.М., Гуреев В.М. Интенсификация теплообмена в теплообменном аппарате с помощью луночных интенсификаторов. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 9-10. – С. 31-37.

J. Jianguo, Ph.D. student

G. Varlamov, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 000-0002-4818-2603

K. Romanova, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-9738-3383

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

L. Suxiang, Dr. Eng. Sc., Prof.

L. Zhigang, Dr. Eng. Sc., Prof.

Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences (Jinan, China)

INFLUENCE OF THERMAL RESISTANCE OF AIR CONDENSER TUBES ON STEAM COOLING EFFICIENCY

The research is carried out using a mathematical model of conditions and features of condensation processes with the influence of changes in internal and external thermal resistances of working bodies, which occur during contamination of outside and inside metal pipes of heat exchange surfaces of air condenser capacitor. Particular attention is paid to the selection, detailing and determination of more than twenty basic parameters that characterize the operation of the direct cooling unit of the condensing unit for the summer, the conditions of heat transfer processes between the working bodies taking into account the finned outer surface of elliptical condenser tubes. The results of experiments on the mathematical model are analyzed and the influence of the incoming air velocity and ambient temperature on the output steam pressure in the condenser direct air cooling system within the change of internal and external thermal resistances in the range $0-0.001(m^2\cdot K)/W$ due to cooling tube contamination is determined. air condenser steam turbine installation. Conditions, character and features of influence of thermal resistance of pollution in cooling tubes on steam pressure at an exit from them are defined, the basic factors defining steam pressure at an exit, necessity of the organization of control of thermal resistance of pollution in a pipe during unit operation at variable operating conditions and expediency is substantiated. conducting test studies of operating modes while taking into account the influence of thermal resistance of external and internal pollution on the thermal efficiency of the cooling unit.

Studies have shown that at a fixed value of the heat load of the exhaust steam, the pressure of the steam outlet increases with increasing ambient temperature and decreasing the speed of the incoming air.

Keywords: *condenser, air cooling, urgent resistance, cooling efficiency*

REFERENCES

1. Bezrodny M.K., Varlamov G.B., Kudelya P.P. Heat transfer at free convection and boiling of water and freon-12 on a plate in the field of centrifugal forces // Scientific news of NTUU "KPI". -1999. -№2. - P.26-31.
2. Verkin B.I., Kirichenko Y.A., Rusanov K.V. Heat exchange at boiling of cryogenic liquids. Kiev: Naukova Dumka, 1987. 264p.
3. Butuzov A.I. etc. Experimental data on boiling of freon-12 and water at free movement in the conditions of inertial overloads. - Thermophysics of high temperatures, 1969, 6, №3, p. 490-494.
4. Kalimullina D.D., Gafurov A.M. New cooling systems for condensers of steam turbines at TPPs. // International scientific journal "Innovative Science". - №3 / 2016. - p.100-101.
5. Gafurov A.M., Gafurov N.M. Replacement of air cooling of steam turbine condensers with a CO₂ circulation loop. // Innovative Science. - 2016. - No. 1-2 (13). - p. 27-29.
6. Gafurov A.M., Gafurov N.M. Replacement of air cooling of steam turbine condensers with a circulation loop for C3H8. // Innovative Science. - 2016. - No. 1-2 (13). - p. 29-31.
7. Ding Ermou. Air cooling technology in power plant. – Beijing: Water Conservancy and Electric Power Publishing House, 1992.– 218 p.
8. E. S. Millias. Air-cooled power plant . – Beijing: Machinery Industry Press, 1986.– 186 p.
9. Gureev V.M., Ermakov A.M., Misbakhov R.Sh., Moskalenko N.I. Numerical modeling of a shell-and-tube heat exchanger with annular and semi-annular recesses. // Industrial energy. - 2014. - No. 11. - p. 13-16.
10. Moskalenko N.I., Misbakhov R.Sh., Ermakov A.M., Gureev V.M. Modeling the processes of heat transfer and hydrodynamics in a shell-and-tube heat exchanger. // News of higher educational institutions. Energy problems. - 2014. - No. 11-12. - p. 75-80.
11. Varlamov G.B., Priymak K.O., Olinevich N.V., Ocheretyanko M.D. Features of integrated energy assessment of the actual environmental performance of energy facilities. // Electromechanical and energy saving systems - 2015 - №4 / 2015 (32). - p. 75-81.
12. Yan Junjie, Zhang Chunyu. Theoretical study on the characteristics of direct air cooling system under variable operating conditions . – Thermal Power Engineering.–2000 (6), 601-603pp.
13. Zhang Chunyu. Study on Economic diagnosis theory of air cooling unit operation in thermal power plant . – Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.– 240 p.
14. Yan Junjie, Zhang Chunyu. Study on economic diagnosis theory of direct air cooling unit .–Journal of Test Technology, North China Institute of Technology.–2000 (1), 1-6pp.
15. Yang Shiming. Heat transfer .– Beijing: Higher Education Press, 1998.– 170 p.
16. Zhu Xiuguan. Principle and calculation of heat exchanger.– Beijing: Tsinghua University Press. – 1987, 346-348pp.
17. Zhou Lanxin, Yang Jing, Yang Xiangliang. Study on variable operating condition characteristics of 600MW direct cooling unit . – Power Engineering. – 2007 (6), 623-627pp.
18. Gardner David, Fontes Roger, Casey, Richard. Bundling advanced technologies to achieve maximum efficiency and environmental acceptability in a modern coal-fired power plant. – Proceedings of the 2003 International Joint Power Generation Conference. – 2003, 1011-1029pp.
19. Gureev V.M., Misbakhov R.S., Ermakov A.M., Moskalenko N.I. Increasing the efficiency of shell-and-tube heat exchangers with the use of well and semi-circular recesses. // Energy of Tatarstan. - 2014. - No. 3-4 (35-36). - p. 61-64.
20. Misbakhov R.S., Moskalenko N.I., Ermakov A.M., Gureev V.M. Intensification of heat transfer in a heat exchanger using well intensifiers. // News of higher educational institutions. Energy problems. - 2014. - No. 9-10. - p. 31-37.

Надійшла 23.11.2020

Received 23.11.2020

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ SUSTAINABLE ENERGY

D. Derevianko, Ph.D Assoc, Prof., ORCID 0000-0002-4877-5601

O. Danilin, Ph.D Assoc, Prof., ORCID 0000-0003-3207-1156

K. Hilevych, student

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

PECULIARITIES OF LIGHTNING PROTECTOR OF GROUND SOLAR POWER PLANTS IN UKRAINE

One of the most promising and developing areas in the energy sector is development of renewable energy sources. Among others technologies of solar energy and wind power are the fastest to develop in the sector. That is why solar power plants are under discussion in this paper. The increase in the Solar Power Plant's capacity in Ukraine from 2018 to 2020 reached 7 times. Problems that may interfere with the functioning of the ground solar power plants are considered as this technology covers large areas of land and is on the 1st place on the amount of lightning strikes among the renewables. Ways to solve the problems associated with the damage from direct lightning strikes for ground solar power plants are discussed in this paper. Active and passive types of lightning protection for inland solar power plants are investigated and their modeling is carried out and presented in this paper. The measures proposed in this paper based on the implementation of an active lightning protection system ensure uninterrupted operation of the ground solar power plants, avoid reduction of service life and unnecessary economic costs for the replacement of damaged photovoltaic modules, reduced costs related to complexity of installation of passive system in comparison to active lightning protection system.

Keywords: renewable energy sources, solar power plants, lightning protection, direct lightning strikes, passive lightning protection, active lightning protection, SWOT-analysis.

Introduction. The Ukrainian energy sector seeks to change its operating policy by focusing on European Union's solutions and innovations in the development of renewable energy sources (RES). According to the "New Energy Strategy of Ukraine until 2035: security, energy efficiency, competitiveness" reforms that will increase the share of RES to 25% in Ukraine are planned [1]. This will make Ukraine's energy sector attractive to foreign investors, reduce the share of harmful emissions and be a step towards the implementation of Directive 2010/75 / EU on industrial emissions into Ukrainian legislation.

The increase in the Solar Power Plant's (SPP) capacity in Ukraine from 2018 to 2020 reached 7 times. The installed capacity of SPP in January 2020 was 5300 thousand MW [2]. From these data we can conclude that solar energy is a popular type of RES in Ukraine. Ukraine's geographical location and climatic zones allow the construction of SPP and the development of this segment in RES sector, but in some southern and eastern regions the risk of lightning striking a solar station is significantly higher (see Figure 1).

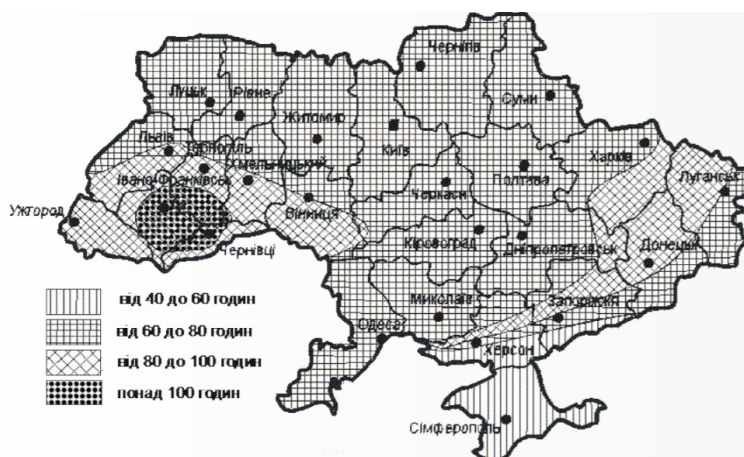


Figure 1 - Map of the average duration of thunderstorms per year in hours in Ukraine [3]

© Д.Г. Дерев'янку, О.В. Данилін, К.М. Гілевич, 2020

Lightning strikes in ground-based SPP can cause mechanical damage to equipment, fire and explosion, Ohmic heating of conductors, release of hazardous products - hazardous chemicals, electric shock to humans and animals due to contact voltage and step voltage, so lightning protection is an important solution in SPP.

Purpose of this paper: to investigate the work of active lightning protection and to carry out modeling on the example of the designed SPP. To present the solutions to improve the lightning protection system of SPP. To carry out a SWOT-analysis of the selected lightning protection system.

Tasks to achieve the purpose: to study the structure and operation of lightning protection systems; to implement active lightning protection system for ground SPP.

1. The structure of lightning protection

The system of protection against direct lightning strikes includes:

1. Lightning receiver - part of the structure of the lightning rod (usually made of aluminum, steel and copper,) which intercepts lightning and takes a direct hit, directing the lightning current to the underground part of the lightning rod - grounding. Lightning rods can consist of any combination of the following elements: rods, taut wires (cables), mesh conductors (nets).

2. Earthing conductors - metal or reinforced concrete structures of buildings, structures, external installations, and lightning rod supports, which stand alone, etc., which are in contact with the ground.

3. Current arrester - part of the lightning arrester structure which is designed to divert lightning current from the lightning rod to the ground and is laid in straight and vertical lines so that the path was the shortest. [3]

2. Passive lightning protection of ground SPP

Considering the operation of passive lightning protection on the example of SPP designed in the framework of the bachelor's project K. Hilevich, on the topic "Organization of lightning protection and grounding of a ground solar power plant." Lightning protection was provided for the ground SPP of industrial purpose, which is located in the Kyiv region. In order to protect the SPP from direct lightning strikes (DLS) it was proposed to use single rod lightning protection system, lightning rod on the crest of the company LEO LIGHTMAN M10 / 09. [4] (see Fig. 2).

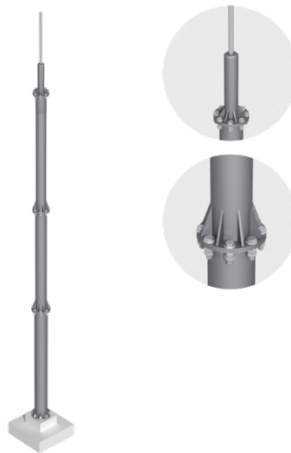


Figure 2 - Lightning rod on the crest of LEO LIGHTMAN M10 / 09

The model of the rod lightning protection system of the designed SPP is shown in Figure 3:

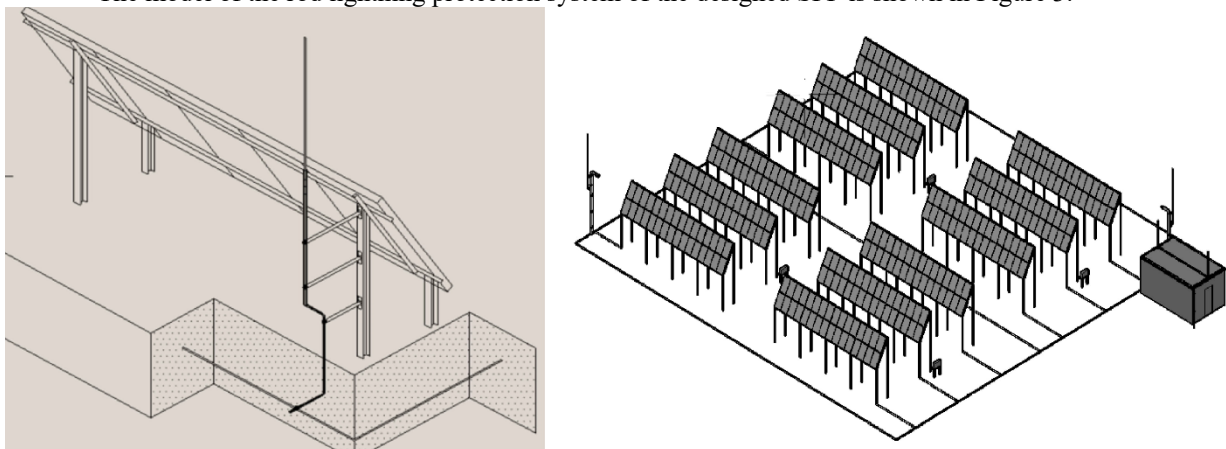


Figure 3 - Model of the system of rod lightning protection of ground SPP

The initial data of the lightning protection calculation of the designed SPP are given in Table 1. The radius of the protective cosine was determined by the method of the radius of the protective cone of a single rod lightning rod for the outer protection areas of the double rod lightning rod system.

Table 1 - Initial data for the calculation of lightning protection of the designed SPP

Indexes	
Lightning protection level (LPL)	I
The total area of SPP-1, m ²	3557
Lightning rod height, m	4,4
Total height of the structure, m	6,8
Total rods, pieces	80
Reliability of protection against DLS	0,9

The radius of the horizontal section of the protection of a single rod lightning rod is according to the formula:

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_0 - h_x)}{h_0},$$

where r_0 – the radius of the cone on the earth's surface;

h_0 – the height of the cone;

h_x – lightning rod height.

The radius of the protective cosine of designed and examined SPP is:

$$r_x = \frac{8,16 \cdot (5,78 - 2,4)}{5,78} = 4,76$$

Protection zone of rod lightning rods for ground SPP is shown in Fig. 4.

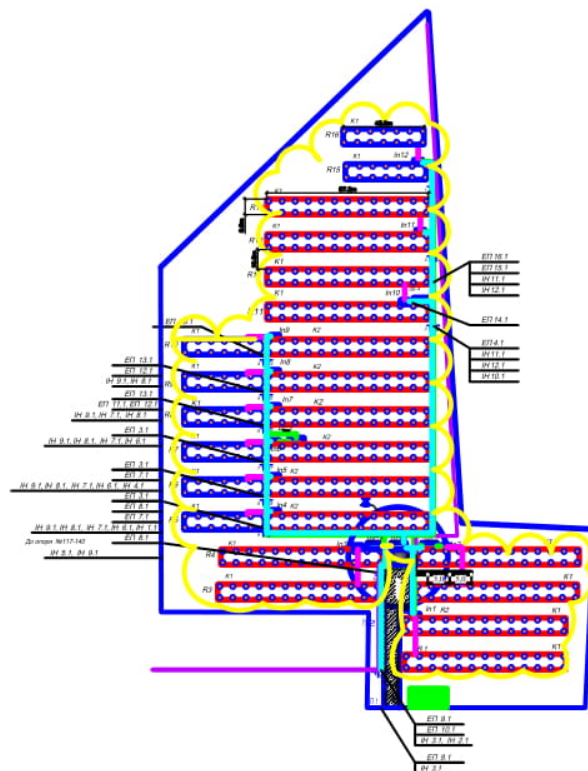


Figure 4 - Zone protection zone of lightning rods for ground SPP

3. Modern active lightning protection to replace passive

Today, technologies are rapidly evolving, improving systems for protection against overvoltage and short-circuit currents, and so on. But the factor influencing the equipment, especially SPP such as weather conditions (especially lightning), has not disappeared. Passive lightning protection is not very relevant now, given that there is already active lightning protection systems on the market.



Figure 5 - Active lightning receiver [5]

To implement active lightning protection, a SWOT-analysis of the latest protection against DLS SPP was conducted (see Tab. 2).

Table 2 - SWOT-analysis of active lightning protection system for SPP

Strengths:	Weak sides:
<ul style="list-style-type: none"> • Principle of operation: the electronic system causes ionization much earlier and with greater intensity • Radius of protection of one current collector to 100 m • The protection zone has the form of a capsule • Installation, maintenance and repair are proportional to the number of system elements • Low complexity of installation 	<ul style="list-style-type: none"> • The cost of upgrading the old lightning protection system • Imperfect documentation base for design and operation
Opportunities:	Threats:
<ul style="list-style-type: none"> • Lightning protection of any type of objects • Support for domestic producers • Installation of modern equipment 	<ul style="list-style-type: none"> • Lightning unpredictability • Impossibility of 100% protection

Based on the SWOT-analysis, we can conclude that the introduction of an active lightning protection system SES is appropriate. Single active lightning rods, GROMOSTAR 60 and GROMOSTAR 45 crest lightning rods will be used to protect against DLS. [6]

Data on the category of protection and the area of SPP are given in table 1. The protection radius of one active current collector is specified in the catalog.

The area of protection of active lightning rods for ground SPP is shown in Figure 6.

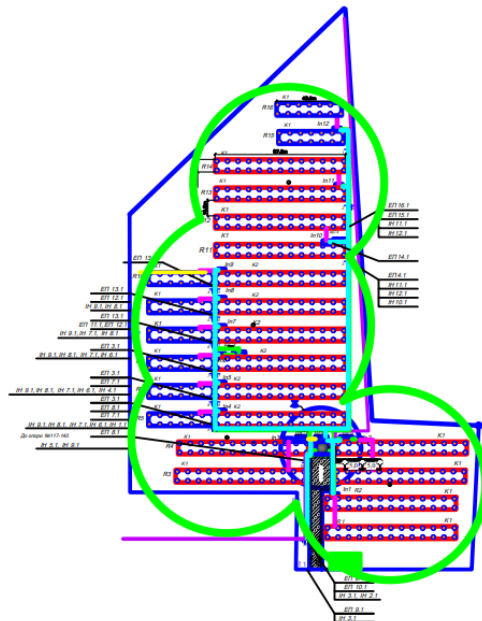


Figure 6 - Zone of protection of active lightning rods for ground SPP

Conclusion: The proposed measures to implement an active lightning protection system ensure uninterrupted operation of the ground SPP, avoid reduction of service life and unnecessary economic costs for the replacement of damaged photovoltaic modules, reduced costs related to complexity of installation of passive system in comparison to active.

REFERENCES

1. "New Energy Strategy of Ukraine until 2035: security, energy efficiency, competitiveness" [Electronic resource]. - 2017. - Mode of access to the resource: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.
2. Enhanced SPP capacity and growth in the European Union and some countries of the world URL: <https://www.solarpowereurope.org/eu-market-outlook-for-solar-power-2019-2023/>
3. DSTU B B.2.5-38: 2008 Lightning protection of buildings and structures (IES 62305: 2006, NEQ) Order of 27.06.2008 № 269 On adoption of the national standard date of repeal 01.11.2019 URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=40238
4. Electronic catalog URL: <https://www.leolightman.com/product-details/m10/>
5. Active lightning rod URL: <https://gromovyk.com.ua/p510530096-aktivnij-bliskavkoprijmach-gromostar.html>
6. Electronic catalog URL: <https://tdsb.com.ua/ru/elko-bis/gromostar/>

УДК 681.12

Д.Г. Дерев'янюк, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-4877-5601

О.В. Данілін, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-3207-1156

К.М. Гілевич, студентка

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОСОБЛИВОСТІ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ НАЗЕМНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ

Одним з найбільш перспективних напрямків у енергетичному секторі є розвиток відновлюваних джерел енергії. Серед інших, технології сонячної енергетики та технології вітроенергетики найшвидше розвиваються у цьому секторі. Ось чому сонячні електростанції розглянуто у цій роботі. Збільшення потужності сонячних електростанцій в Україні з 2018 по 2020 роки склало близько 7 разів. Розглянуто проблеми, які можуть заважати функціонуванню наземних сонячних електростанцій, оскільки ця технологія охоплює значні площі посідає 1-е місце за кількістю ударів блискавки серед відновлюваних джерел енергії. Шляхи вирішення проблем, пов'язаних з пошкодженням від прямого удару блискавки наземних сонячних електростанцій, обговорюються в цій роботі. Досліджено активні та пасивні типи блискавкозахисту для наземних сонячних електростанцій, проведено та представлено їх моделювання. Заходи, запропоновані в цій роботі, засновані на впровадженні активної системи блискавкозахисту, забезпечують безперебійну роботу наземних сонячних електростанцій, уникають скорочення терміну служби та зайвих економічних витрат на заміну пошкоджених фотоелектричних модулів, зменшують витрати, пов'язані зі складністю установки пасивної системи порівняно з активною системою блискавкозахисту.

Ключові слова: поновлювані джерела енергії, сонячні електростанції, блискавкозахист, прямі удари блискавки, пасивний блискавкозахист, активний блискавкозахист, SWOT-аналіз.

Надійшла 24.11.2020

Received 24.11.2020

D. Matushkin, graduate student ORCID 0000-0003-4431-7862
A. Bosak, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0545-9980
L. Kulakovskiy, Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer ORCID 0000-0003-1273-6894
National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

ANALYSIS OF FACTORS FOR FORECASTING ELECTRIC POWER GENERATION BY SOLAR POWER PLANTS

The new model of the wholesale electricity market in Ukraine causes appearance the market for the day ahead. In this market, the generating company undertakes to supply a certain amount of electricity. So, it is necessary to carry on the most accurate forecast of possible electricity generation by solar power plant (SPP). Generation value depends on certain factors. A brief summary of different influence of parameters on the PV cell performance has been provided. The article analyzes and identifies the factors that should be included in the forecast mathematical model of electricity generation by a solar power plant for a certain short-term period. According to analyzed data from SPP located in the Kyiv region, such parameters are the intensity of solar radiation, temperature and humidity, wind speed, and atmospheric pressure. The degree of influence of these factors on the initial function of electric energy generation were estimated by analyzing the scatter plot diagrams of relationship between parameters and correlation coefficients. Thus, the analysis of the influence of factors on the magnitude of electricity generation allowed to determine the priority of including each of the parameters in the mathematical model of the SPP power forecast. It was established that the influence of certain climate parameters for target function is different in each season. Therefore, in the mathematical model for forecasting electric power generation, it is necessary to take into account seasonality. In addition, the dynamic value change of factors also affects the current magnitude of electricity generation. Moreover, at different times of the year and with different combination of the corresponding values of climatic parameters, this effect may have different magnitudes. Therefore, the data obtained from the last periods before the forecasting should have a greater impact on obtaining the predicted value than the data from previous periods.

Keywords: forecasting, electricity generation, solar power plant, correlation matrix, intensity of solar radiation.

Introduction. The wholesale electricity market (WEM) must move to a new operational model according to the regulation's rules adopted by now in Ukraine. This market has been implemented in many foreign countries and is called the model of bilateral agreements and balancing market [1]. One of its distinctive features is organization the general structure of the WEM market for the day ahead with the balancing part. This market allows supplier to purchase additional amount of electricity or sale excessively ordered amount at auction. It causes the appearance of new organizational management issues. Resolving of these tasks requires the development of fundamentally new means of automation the management processes and mathematical modeling that should base on modern mathematical methods. One of such tasks is operational daily planning of electricity supplies inside of the wholesale market. It is impossible without accuracy forecast of generated electricity. The generation of electricity by a solar power plant (SPP) depends on climatic conditions that change over time. To overcome this issue, it is important to use new intelligent methods that take into account value of all parameters which affect the accuracy of the forecast [2].

Purpose and objectives. The aim of the work is to determine the patterns for forecasting the amount of electricity generated by solar power plants on the short-term period depending on climatic parameters. These patterns will allow to build forecasting mathematical models. Determination the list of climatic factors, the degree and nature of their impact on the output capacity of the SPP is needed to build dependencies and farther conclusions.

Material and research results. One of the most important factors determining the change of the amount of electricity generation in the short term is climate change. The main such climate factor is the intensity of solar radiation, W/m^2 . The voltage produced by the solar cell depends on the incident light flux, namely: the voltage increases with increasing illumination to a certain scale. The next factor that should be highlighted is the ambient temperature. It directly affects heating of the panels. Most panels are designed to operate in temperature mode from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. More lower ambient temperature indicates a more higher level of conversion [3]. For example, a 270-watt panel in hot summer with $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature generate 257 W of electricity, and in winter at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 298 W [4]. This is due to the fact that with increasing temperature, the flow of electrons inside the element increases. Process of increasing electrons' flow causes an increase current and decrease voltage. The

voltage decreases faster than the current increases. Therefore, the total power ($P = UI$) decreases and the efficiency of the panel is reducing. Manufacturers indicate the value of the temperature coefficient of the panel for the numerical characteristic of the decreasing the electrical energy generation caused by increasing temperature of the solar panel. The temperature coefficient is a parameter that indicates how much the efficiency of the solar panel decreases with increasing air temperature by each degree. The value of this factor is obtained experimentally by the manufacturer and indicated in the specifications. In summer the temperature of panel can rise to 60-70 ° C. On average, rising temperature by 20 °C cause the loss of power generation to about 10% [5].

The influence of air humidity on the efficiency of solar panels was studied in [6-8]. Experiments conducted in [8] showed that humidity significantly affects the performance of the solar panel. The generation of electricity from solar panels can be reduced to 15-30% depending on the humidity level, as high humidity can form a layer of water on their surface. In this case, the probability for appearing clouds, fogs and scattering radiation also increases. In [6] it was shown that an increase in humidity by 5% causes a decrease in efficiency by 7.5%, by 10% - 15.8%, and by 25% - 30%.

The next parameter that affects the amount of electricity generation is the wind speed. By increasing the wind speed, more heat can be removed from the surface of the photocells. Also, higher air velocity reduces the relative humidity of the atmosphere. It leads to improved efficiency. Conversely, the wind raises dust and disperses it in the environment, which can lead to shading and poor performance of photovoltaic cells [9].

The summary of the results is shown in Table 1.

Table 1 – A brief summary of different influential parameters on the PV cell performance

	Dust	Humidity	Air Velocity	Efficiency
Dust	More dust settlement	Insignificant effect	Insignificant effect	Drops
Humidity	Causes more dust coagulation	-	Insignificant effect	Mostly drops
Air Velocity	More dust deposition Less dust deposition	Decreases	-	Surges occasionally Improves

It is also worth noting the possibility of influencing the wind direction. Depending on the angle at which the wind blows to the panels, the effect of wind speed on the efficiency of the panels may increase or decrease. The direction of the wind can also affect the shading of the panels by the deposition of dust or snow. The snow will settle better on the surface if the wind blows directly on the panel. The influence of wind direction on the placement of modules needs to be further investigated.

It is a known that before bad weather (precipitation) the atmospheric pressure drops, and before clear (dry) weather – the pressure increases [10]. Short-term precipitation has small effect on efficiency. However, significant rainfall is usually character in cloudy weather. Radiation and, accordingly, generation in this situation are reduced. Atmospheric pressure by itself is not a factor that directly affects the level of electricity generation. But it has an indirect effect on the main factors. In general, depending on the increase or decrease of atmospheric pressure, the influence of temperature, wind and humidity on energy production can increase or decrease.

Consider the degree of influence of factors on the value of electricity generation on the example of SPP in the village Dyerka, Kyiv region. The data consist of more than 26 thousand samples collected from July 1, 2020 to December 31, 2020. They are characterizing the operating conditions of solar panels (9 MW).

The data set consists of two types of data:

1) Weather data. The first part of the data consists of measured weather parameters such as temperature, solar radiation, humidity, atmospheric pressure, wind direction and speed.

2) Data from electricity counter. The second part – accounting of the amount of electricity sold to the external general network, including PV power, which is forecasting.

The data set consists of the actual value of electricity generation for 10-minute intervals (the electricity counter transmits the generation value to the monitoring point with a discreteness of 10 minutes) and the measured climatic parameters for this period.

We used a correlation matrix to estimate the actual value of the influence of each parameter on the objective function and separately on each of the input factors of the model. It is a structured approach for ranking the importance of predictors or input variables (input variables that have the greatest impact) on output function. The correlation coefficient for the sample is determined from the expression [11]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

where \bar{x} , \bar{y} – the average values for the sample x and y , s_x and s_y – unbiased (adjusted) estimate of the standard deviation for x and y .

A positive value of the coefficient indicates direct influence of each factors. In case the value of a certain parameter increases, the value of the second placed at the intersection of the matrix also increases and vice versa. For this purpose, a thermal map of the correlation matrix (Fig. 1) was constructed. It basis on the data from the half-year operation of the solar panel with 10-minute discreteness.

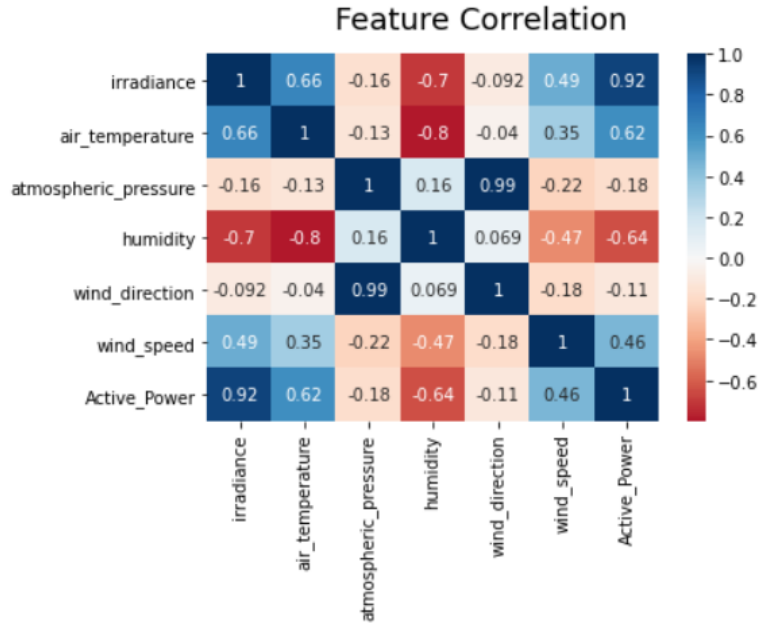


Figure 1 - Correlation matrix

Three parameters have positive correlations with the output – active power generation. Such parameters are solar radiation (92%), air temperature (62%) and wind speed (46%). And relatively humidity has negative correlation. It should be noted that the wind direction is correlated with atmospheric pressure of 99%. This means that the values change of one parameter almost completely depending on the value of another. In other words, these factors in the model will be duplicated. And this will increase the complexity of the model, may increase the error of the model and increase the possibility of retraining. Therefore, the "wind speed" parameter is excluded from the model.

A scatter plot diagram of electric power generation values with solar radiation parameters is shown on Fig. 2, with ambient temperature on Fig. 3, with wind speed on Fig. 4 for the studied period at 10-minute intervals.

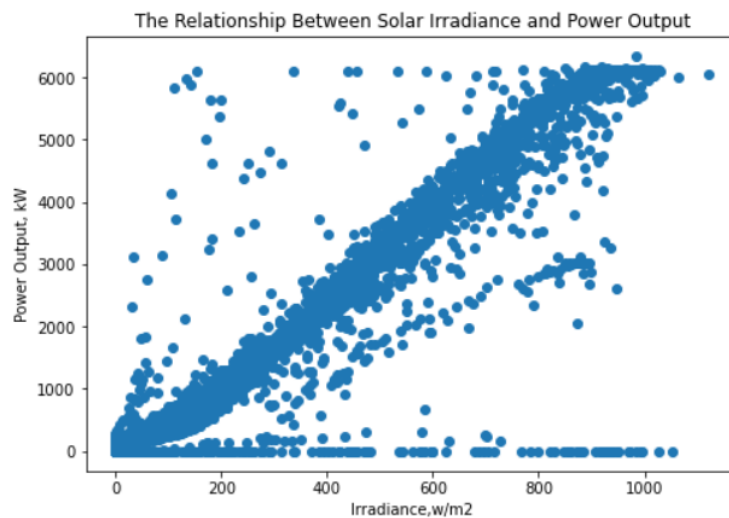


Figure 2 - Dependence of the output electric power generation of the SPP on solar radiation

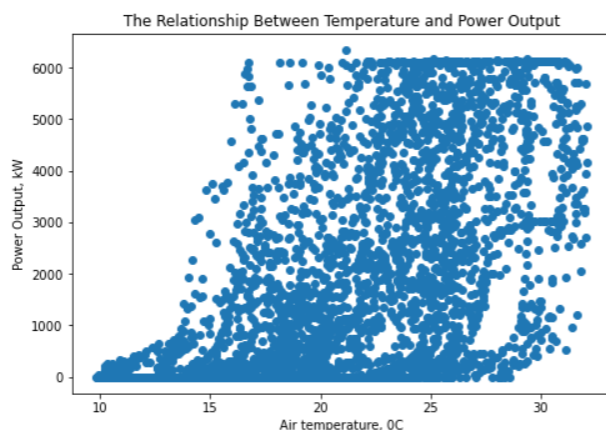


Figure 3 - Dependence of the output electric power generation of the SPP on the ambient temperature

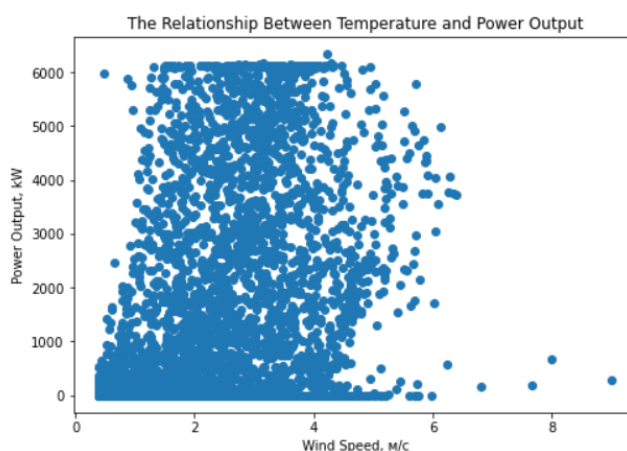


Figure 4 - Dependence of the output electric power generation of the SPP on wind speed

Figure 2 shows a linear relationship between the parameters of solar radiation and output power generation with a certain amount of data emissions. Instead, there is no clear dependence of electricity generation data with wind speed and ambient temperature. This once again indicates that the main parameter that affects the amount of electricity generation of SPP - is the intensity of solar radiation. To determine the influence of other factors, it is necessary to analyze the tendency of change electricity generation at the constant values of solar radiation. Also, it should be analyzing the physical meaning of correlations and determine the sequence of including parameters into the model.

To do this, take a fragment of the input data (Table 2) for the forecasting of energy generation at the same value of solar radiation in the investigative period.

Table 2 - Fragment of data on climatic parameters and the amount of generation active electricity by the same level of solar radiation

Timest amp (day)	Timestamp (hours and minutes)	Solar radiation, W/m ²	Air temperature, °C	Atmospher ic pressure, mBar	Humidi ty, %	Wind directio n, °	Wind speed, m/s	Active Power, kW
02.07	8:10:00	440,6	24,4	499,85	64,4	66,5	2,0	3984,4
20.07	8:20:00	440,6	21,0	500,13	66,1	104,2	1,1	4262,7
13.10	13:30:00	440,6	18,5	501,62	74,4	311,5	4,8	7102,5
18.10	13:20:00	440,6	7,7	500,44	64,2	141,3	5,3	7490,4

On the table 2 the biggest energy generation by the same solar radiation (W / m²) was in the autumn month. The air temperature in July 2nd was higher than July 20th (above 25 °C), and since it is a summer month, the surface temperature of the panel was higher. This reduces the generation of active power. However, the humidity

on July 2nd was higher and the wind speed was lower. According to the correlation analysis, these indicators should indicate that the generation of active power should be higher. Therefore, when the air temperature is more than 20 °C with the same solar radiation. So, surface of panel is heated for more than 25 °C, the efficiency of the panels decreases. Other factors in this case have less influence on the amount of active power generation. Therefore, the air temperature, in addition to having the greatest direct relationship to solar radiation (in general, the amount of solar radiation is greater at higher air temperatures), has the biggest impact on the generation of active electricity at constant light level. And it is negative compare with positive correlation on the whole investigated period (fig. 1). According to table 1, in the autumn month the generation is almost on 30% higher. In this period air temperature is decrease and wind speed increase. It indicates the need to include in the model also the wind speed parameter. On October 18, the electricity generation is bigger than on October 13th. In October, the air temperature had less effect than in summer on reducing the efficiency of the solar panel, and the wind speed was increased slightly. In this case, it is necessary to take into account the value of humidity that on October 13th compared to October 18th is 10% higher. Atmospheric pressure also increased. Therefore, at the last stage of the feature selection is necessary to include into the model the humidity parameters and then atmospheric pressure. And for the model of forecasting the intensity of solar radiation, it is necessary to take into account the change of climatic factors depending on the seasonality.

Discussion of results and conclusions:

It was established that the level intensity of solar radiation has the greatest influence on the generation of electric energy. Moreover, at different times of the year and in combination with the corresponding values of other climatic parameters, this effect may have different influence on output function. This indicates that to model for forecasting electricity generation in addition to the value of irradiance should include ambient temperature, wind speed, humidity, and in certain periods, atmospheric pressure. It was found that the value of electricity generation is based on the dynamics of data over time. That is why, high temperatures for several days (over 20 °C) cause the solar panels to heat up to high temperatures and, accordingly, reduce their efficiency. Therefore, in a ten-minute interval, the magnitude of lasing under such conditions will be lower than at short-term (several hours) the same temperature. Therefore, to build a mathematical model for the forecast of electricity generation for the day (hour) ahead, the degree of importance of the data taken immediately before the forecast will be higher than the data for previous periods. In addition, the forecast model should take into account the seasonality of the data, when changes in climatic parameters may affect the efficiency of solar panels in different ways.

Thus, the analysis of the influence of factors on the magnitude of electricity generation allowed to determine the priority of including each of the parameters in the mathematical model of SPP power forecast. In further research it is necessary to develop a model that separately calculated the generation forecasts for each period of the year and the dynamics of change of factors. Such a model can be built using a model of long-term short-term memory based on recurrent neural networks [12]. It can be used both for computer modeling of SPP operation and calculation of its technical and economic indicators, and for further analysis of SES operation as a part of combined energy systems with various energy sources, including RES.

REFERENCES

1. On the electricity market: Law of Ukraine № 2019-VIII of 13.04.2017 URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (Accessed 21.07.2017). (Ukr)
2. Butenko V., Baidala V., Kozyrska T. Factors of solar electric power development in Ukraine. *Investments: practice and experience*. 2019. №17. Pp. 5-11. (Ukr)
3. Parsokhonov, Abdulkobi. Renewable Energy Source from Natural Thermal Expansion and Contraction of Matters. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*. 2016. Pp. 121-130.
4. Efficiency of solar panels URL: <https://axiomplus.com.ua/news/effektivnost-solnechnyh-panelej/#klimat>. (Accessed 19.03.2021). (Rus)
5. Secrets of the best conditions for maximum efficiency of solar panels in systems under the "Green Tariff" URL: <https://solarsystem.com.ua/zvit-pro-robotu-sonyachnyh-elektrostantsij-pid-zelenyj-taryf-za-traven-2018-roku> (Accessed 19.03.2021). (Ukr)
6. Panjwani, Manoj Kumar, and G. Bukshsh Narejo. Effect of humidity on the efficiency of solar cell (photovoltaic). *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2014. Vol 2.4. Pp. 499-503.
7. Park, N. C., W. W. Oh, and D. H. Kim. Effect of temperature and humidity on the degradation rate of multicrystalline silicon photovoltaic module. *International Journal of Photoenergy*. 2013. Vol. 2. Pp. 107-117.
8. Erdem, C. U. C. E., Pinar Mert CUCE, and B. A. L. İ. Tulin. Impact of humidity on current parameters of solar cells. *Journal of Energy Systems*. 2018. Vol. 2.3. Pp. 84-96.
9. Mekhilef, Saad, Rahman Saidur, and Masoud Kamalisarvestani. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Pp 2920-2925.
10. Singhania, Shalabh, et al. Temperature and seeding effects on the precipitation of scorodite from sulfate solutions under atmospheric-pressure conditions. *Metallurgical and materials Transactions*. 2005. Pp. 327-333.
11. Taylor, Richard. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *Journal of diagnostic medical sonography*. 1990. Pp. 35-39.

12. Pan, Cheng, et al. Very short-term solar generation forecasting based on LSTM with temporal attention mechanism. *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, 2019.

УДК 621.316

Д.С. Матушкін, аспірант, ORCID 0000-0003-4431-7862

А.В. Босак, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-0545-9980

Л.Я. Кулаковський, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0003-1273-6894

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

Нова модель оптового ринку електроенергії передбачає функціонування ринку на добу вперед. На цьому ринку генеруюча компанія бере на себе зобов'язання по постачанню певної кількості електроенергії. Тому для сонячної електростанції (СЕС) необхідно здійснювати якомога точний прогноз можливого виробітку електроенергії, що залежить від певних факторів. В статті було проаналізовано та виділено фактори, що повинні бути включені в прогнозну математичну модель визначення потужності сонячної електростанції на певний короткостроковий період на основі даних СЕС розміщеної в Київській області., а саме інтенсивність освітлення, температура та вологість навколишнього середовища, швидкість вітру та атмосферний тиск. Здійснено аналіз ступеня впливу цих факторів на вихідну функцію генерації електричної енергії. Встановлено, що вплив певних кліматичних параметрів в залежності від пори року є різним, а тому в математичній моделі прогнозу необхідно враховувати сезонність. Окрім цього, динаміка зміни значень факторів також впливає на поточну величину генерації електричної енергії. Тому дані отримані за останні періоди часу перед прогнозом повинні мати більший вплив на генерацію прогнозовної величини аніж дані попередніх періодів.

Ключові слова: прогнозування, генерація електричної енергії, сонячна електростанція, кореляційна матриця, інтенсивність освітлення

Список використаної літератури

1. Про ринок електричної енергії: Закон України № 2019-VIII від 13.04.2017 р. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення 21.07.2017).
2. Бутенко В. М., Байдала В. В., Козирська Т. О. Фактори розвитку сонячної електроенергетики в Україні. *Інвестиції: практика та досвід*. 2019. №17. С. 5-11.
3. Parsokhonov, Abdulkobi. Renewable Energy Source from Natural Thermal Expansion and Contraction of Matters. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*. 2016. Pp. 121-130.
4. Эффективность солнечных панелей URL: <https://axiomplus.com.ua/news/effektivnost-solnechnyh-panelej/#klimat>. (дата звернення 19.03.2021).
5. Секрети найкращих умов максимальної віддачі сонячних батарей в системах під “Зелений тариф” URL: <https://solarsystem.com.ua/zvit-pro-robotu-sonyachnyh-elektrostantsij-pid-zelenyj-taryf-za-traven-2018-roku> (дата звернення 19.03.2021).
6. Panjwani, Manoj Kumar, and G. Bukshsh Narejo. Effect of humidity on the efficiency of solar cell (photovoltaic). *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2014. Vol 2.4. Pp. 499-503.
7. Park, N. C., W. W. Oh, and D. H. Kim. Effect of temperature and humidity on the degradation rate of multicrystalline silicon photovoltaic module. *International Journal of Photoenergy*. 2013. Vol. 2. Pp. 107-117.
8. Erdem, C. U. C. E., Pinar Mert CUCE, and B. A. L. İ. Tulin. Impact of humidity on current parameters of solar cells. *Journal of Energy Systems*. 2018. Vol. 2.3. Pp. 84-96.
9. Mekhilef, Saad, Rahman Saidur, and Masoud Kamalisarvestani. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Pp 2920-2925.
10. Singhanian, Shalabh, et al. Temperature and seeding effects on the precipitation of scorodite from sulfate solutions under atmospheric-pressure conditions. *Metallurgical and materials Transactions*. 2005. Pp. 327-333.
11. Taylor, Richard. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *Journal of diagnostic medical sonography*. 1990. Pp. 35-39.
12. Pan, Cheng, et al. Very short-term solar generation forecasting based on LSTM with temporal attention mechanism. *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, 2019.

Надійшла 28.11.2020

Received 28.11.2020

В.А. Степаненко, магістр, ORCID 0000-0001-6176-589X
Ю.А. Веремійчук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-0258-0478
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

Впровадження інтегрованої системи енергозабезпечення є ефективним заходом підвищення енергоефективності, зменшення викидів CO₂ та збільшення використання відновлюваної енергії, а також являє собою можливість для виробництва, перетворення та зберігання енергії у взаємозв'язаних інфраструктурах для операторів енергетичних систем та споживачів. Також підвищення рівня енергоефективності системи енергозабезпечення є однією з важливих стратегій уповільнення зростання попиту та пом'якшення негативного впливу на здоров'я, економіку та навколишнє середовище. В статті розглянуто інтегроване використання енергії, запровадження енергетичних хабів як складової частини майбутніх енергетичних мереж та запропоновано принципову схему інтегрованої системи енергозабезпечення у поєднанні з системами вентиляції та кондиціонування. В роботі представлено результати моделювання та проведення обчислювального експерименту функціонування систем вентиляції та кондиціонування в структурі інтегрованої системи енергозабезпечення з урахуванням технічних і експлуатаційних характеристик дахової СЕС, вимог нормативно-технічних документів та будівельних норм. За результатами дослідження встановлено, що графіки генерації СЕС і режими споживання електроенергії системами вентиляції та кондиціонування подібні, що призводить до зменшення експлуатаційних витрат та зменшення навантаження на систему електропостачання будівлі. Набуло подальшого розвитку наукове обґрунтування інтеграції системи накопичення енергії в структуру енергозабезпечення, що забезпечить надійність електропостачання та ефективність роботи сонячної електростанції.

Ключові слова: енергетичний хаб, багатоенергетична система, відновлювальне джерело енергії, накопичення енергії, інтегрована система, генерація електричної енергії, система вентиляції та кондиціонування.

Вступ

У поточному столітті енергетична галузь містить у собі одні з найголовніших проблем, що стоять перед людством. Ці проблеми виникають у різних сферах, такі як постачання, перетворення та споживання енергії. Через зростання населення, збільшення глобального попиту на енергію, дефіциту викопних видів палива та через екологічні проблеми енергетична безпека стала критичною проблемою для всіх країн світу.

Взаємозв'язок енергетики з економічними, соціальними, екологічними аспектами подвоїло важливість цих питань, оскільки енергетична галузь рівноправно забезпечує кінцевих споживачів доступними за ціною, надійними, ефективними, регульованими та соціально прийнятними енергетичними послугами [1].

Оскільки потреби в опаленні та охолодженні, включаючи безпосередній температурний режим у приміщеннях, гарячому водопостачанні, приготуванні їжі, складають понад 40% світового енергоспоживання, то зменшення використання викопної енергії для цих потреб залишається однією з найбільших проблем енергетичного переходу [2].

Більша частина енергії, що використовується для опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВіК), продовжує вироблятися з викопного палива (рис. 1).

Відповідно до аналізу літературних джерел [3,4] на житлові та комерційні будівлі в США припадає майже 42% загального споживання енергії, тоді як значна частина споживання енергії в цьому секторі припадає на опалення, вентиляцію і кондиціонування (35% у житлових та 32% у комерційних будівлях). Також споживання енергії будівлями є основною проблемою і в Європейському Союзі, де на будівельний сектор припадає 40% загального споживання первинної енергії.

В Україні громадські та житлові будівлі також є головними споживачами енергії. На сьогоднішній день головними проблемами таких будівель є витрати енергії на опалення (42 % від всієї виробленої теплової енергії), відсутність контрольованого повітрообміну та недотримання оптимальних умов мікроклімату[5,6].

© В.А. Степаненко, Ю.А. Веремійчук, 2020

Велика частка споживання енергії означає, що швидка декарбонізація, яка використовується для задоволення цих потреб, є критично важливою для досягнення цілей щодо клімату, довкілля та сталого розвитку. Незважаючи на цю реальність, споживання енергії системами ОВіК продовжує зростати, оскільки дані системи використовуються при сучасному будівництві з метою дотримання оптимальних умов мікроклімату. При цих параметрах зберігається тепловий стан людини та створюються передумови для високої продуктивності, тому виконання цих умов регламентується державними та світовими нормами [8,9], та мають дотримуватися при новому будівництві, реконструкції, термомодернізації, капітальному ремонті та технічному переоснащенні існуючих систем.



Рисунок 1 – Частка джерел енергії в загальному кінцевому споживанні енергії на системи ОВіК [7]

Тому реалізація комплексних рішень щодо використання енергії є ефективним способом підвищення енергоефективності, зменшення викидів CO₂ та збільшення використання відновлюваної енергії, що є однією з найбільш актуальних проблем енергетичної галузі. Таким чином, інтегровані енергетичні системи, також відомі як багатоенергетичні системи або енергосистеми з декількома носіями, знаходяться у швидкому розвитку.

Запровадження енергетичних хабів як основної частини майбутніх енергетичних мереж забезпечує можливість для виробництва, перетворення та зберігання енергії у різних взаємозв'язаних інфраструктурах з метою переходу до більш енергоефективних та гнучких систем [10].

Мета та завдання

Метою даної роботи є моделювання та проведення обчислювального експерименту функціонування систем вентиляції та кондиціонування в структурі інтегрованої системи енергозабезпечення з урахуванням технічних і експлуатаційних характеристик дахової СЕС.

Матеріал і результати досліджень

Удосконалення систем опалення, вентиляції та кондиціонування для декарбонізованого енергетичного майбутнього вимагає поєднання конкретних рішень, що відповідають потребам цих систем, доступності ресурсів, рівні розвитку сектору відновлюваної енергетики, існуючій інфраструктурі та макроекономічним умовам. Наявні рішення дуже різняться за багатьма параметрами, включаючи різні температури, залежність палива та ланцюги постачання.

Перехід від викопного палива до ефективних електричних технологій, що використовують відновлювану електроенергію, впровадження електрифікованих технологій опалення, вентиляції та кондиціонування створює значний потенціал для зменшення викидів парникових газів.

Поліпшення теплової ефективності житлових будинків призводить до значної економії енергоресурсів та суттєво знижує витрати на кліматичну політику, оскільки наявність більш ефективних будинків зменшує пікову потужність, потужність охолодження, вентиляції та опалення приміщень, а також загальне споживання енергії. Ця економія коштів особливо велика в кліматі, де пікове електричне навантаження обумовлене потребою в охолодженні приміщення [11].

У зв'язку з цим, а також відповідно до європейських директив та Закону України «Про енергетичну ефективність будівель», в якому у січні 2020 р. було схвалено концепцію реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [12].

Перший крок у трансформації передбачає вдосконалення енергоефективності для зменшення попиту та втрат, де це можливо. Для ефективної роботи систем енергозабезпечення будівлі можуть потребувати значного підвищення енергоефективності, тобто комплексної модернізації [13, 14].

До традиційних рішень щодо енергозбереження при новому будівництві чи реконструкції відносяться методи, пов'язані зі зниженням інфільтрації та ексільтрації повітря, а також із зменшенням

теплових втрат через огорожувальні конструкції будівель і споруд. Проте в сучасних умовах все більшої актуальності набувають роботи із застосуванням технологічних і технічних рішень по організації і конструктивним виконанням систем забезпечення мікроклімату приміщень житлових і громадських будівель, спрямованих на скорочення споживання енергії [15,16].

Одним із способів зменшення електроспоживання системами вентиляції є регулювання продуктивності вентиляційних установок шляхом зміни швидкості обертання їх робочого елемента. Ефективність даного способу регулювання продуктивності досягається за рахунок того, що зменшення швидкості обертання робочого колеса призводить до одночасного зменшення його продуктивності і напору на нагнітання повітря [17].

З врахуванням зростання вартості енергоресурсів і обмежень на встановлену потужність вентиляційне обладнання стає одним з загально визначених пристроїв утилізації теплоти повітря [18].

Також під час експлуатації будівлі відбувається погіршення компонентів систем ОВіК, що призводить до зниження її енергоефективності. Для вирішення цієї проблеми використовують метод безперервного введення в експлуатацію систем ОВіК [19]. Згідно з Федеральною програмою енергоменеджменту у США [20], безперервне введення в експлуатацію забезпечило в середньому економію 20% із терміном окупності менше трьох років (часто один-два роки) у понад 130 великих будівлях.

Однак зниження попиту на енергію вирішує лише частину проблеми, і цього недостатньо для зменшення викидів парникових газів, досягнення цілей сталого розвитку та доступу до енергії. Поряд з ефективністю, відновлювана енергія відіграватиме фундаментальну роль у декарбонізації енергії, що використовується для опалення, вентиляції та кондиціонування.

У більшості варіантів модернізації, відновлювані джерела енергії все ще можуть доповнюватися традиційними джерелами енергії. Наприклад, сонячні теплові системи можуть потребувати резервного живлення. Тому необхідно розглядати широку стратегію декарбонізації систем ОВіК та застосувати комбінацію різних параметрів.

Електрифікація систем ОВіК передбачає використання ефективних електричних технологій, що живляться відновлюваною електроенергією, насамперед у будівлях та промислових підприємствах. Цей шлях поєднує зусилля щодо збільшення частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному секторі, а також електрифікацію систем енергозабезпечення за допомогою енергоефективних приладів.

Хоча широко розповсюджена електрифікація систем ОВіК може суттєво збільшити загальний попит на електроенергію, вона також створює потенціал для забезпечення гнучкості системи електроенергетики шляхом вдосконалення реагування на попит, тим самим полегшуючи інтеграцію більшої частки відновлюваних джерел енергії, таких, як сонячна та вітрова. Але ми повинні враховувати всі галузі енергетики комплексно, а не лише електроенергію. У зв'язку з цим ключовим пунктом для досягнення стійких енергетичних систем є звернення уваги на роль системи, в якій різні енергоносії взаємодіють оптимально та на різних рівнях

Оптимальна продуктивність багатоенергетичних систем може призвести до технічних, економічних та екологічних переваг, таких як підвищення надійності системи, зниження експлуатаційних витрат, споживання палива та викидів шкідливих речовин. Однак для успішної роботи цих систем необхідна інтегрована система управління, яка може оптимально керувати різними компонентами системи [21, 22, 23].

Впровадження концепції *energy hub (EH)* є перспективним варіантом для оптимального управління багатоенергетичними системами та для досягнення комплексної моделі із стійких енергетичних систем. Проаналізувавши різні інтегровані системи енергозабезпечення слід зазначити, що концепції *energy hub (EH)* є перспективним варіантом для оптимального управління багатоенергетичними структурами та для досягнення комплексної моделі із стійких енергетичних систем.

Основними джерелами моделей *EH* є електроенергія та природний газ, серед альтернативних варіантів науковці розглядають потенціал ВДЕ.

Тому запропоновано розглянути інтегровану систему енергозабезпечення корпусу №22 з використанням сонячних електричних станцій (СЕС) та системи вентиляції, принципову схему якої представлено на рис. 3.

Представлена модель *EH* має три вхідні джерела енергії: теплову та електричну мережі, а також обладнана даховою СЕС. Теплова енергія використовується для системи опалення, а головним споживачем електричної енергії, генерованою СЕС, виступатиме запроєктована система вентиляції та кондиціонування.

Моделювання роботи і розрахунок даних систем здійснювався для трьох приміщень загальною площею 216 м² навчального корпусу №22 НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Розрахунок проводився з врахуванням нормам ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування" також керувалися

положеннями ДБН В.2.2-3:2018 "Заклади освіти" , але за умови, якщо вони доповнюють або уточнюють ДБН В.2.5-67:2013, та не погіршують його вимоги.

Приймаючи до уваги, що рівень метаболізму людини при сидячій розумовій роботі становить 70 Вт/м² або 1,2 мет, а в свою чергу термічний опір одягу дорівнює 0,105-0,110 м²·°C/Вт (0,7 кло), то результуюча температура в приміщеннях має дорівнювати 22°C, допустимий діапазон відхилень при цьому складає ± 2 °C.

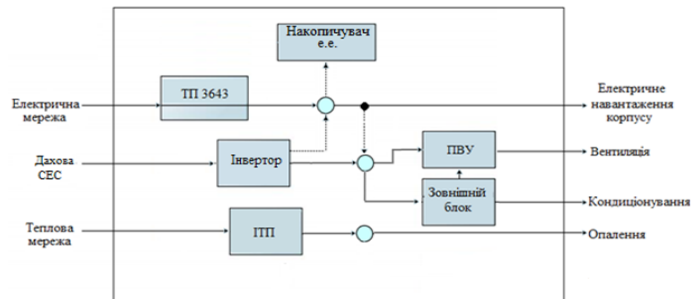


Рисунок 3 – Принципова схема інтегрованої системи енергозабезпечення корпусу №22

При визначенні мінімальної витрати повітря потрібно врахувати забруднюючі речовини, що надходять від огорожувальних конструкцій та внутрішнього оздоблення, а також надходження від людей. Тому мінімальна витрата припливного повітря була обчислена за формулою (1):

$$L_{tot} = n \cdot l_p + S \cdot l_v, \quad (1)$$

де L_{tot} - загальна мінімальна витрата зовнішнього повітря, дм³/с; n - максимальна можлива кількість людей у приміщенні, люд.; l_p - питома витрата зовнішнього повітря на людину, дм³/ (с · люд.); S - загальна площа приміщення; l_v - питома витрата зовнішнього повітря на зменшення концентрації забруднень від будівельних конструкцій, дм³/ (с · м²).

В нашому випадку було дотримано оптимальні умови мікроклімату, оскільки при тривалому перебуванні людини при цих параметрах забезпечується зберігання теплового стану та створюються передумови для високої продуктивності.

Для автоматизації розрахунків навантаження на систему опалення та вентиляції використано програмне забезпечення Audytor OZC (рис. 4), а для системи кондиціонування - "Северный ветер", що має можливість враховувати теплонадходження в тепловому балансі приміщення.

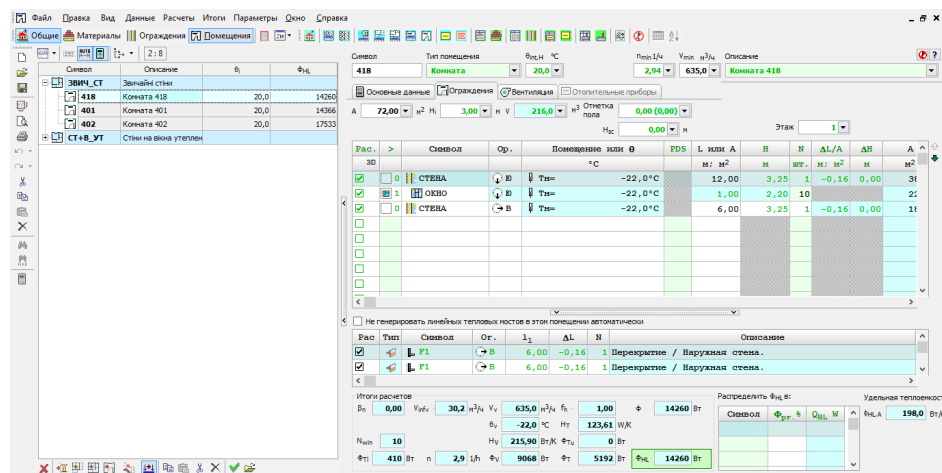


Рисунок 4 – Вікно програми " Audytor OZC " з результатами розрахунків

З метою забезпечення нормованих параметрів мікроклімату проектування систем ОВІК проводиться для температури зовнішнього повітря для найхолоднішої п'ятиденки забезпеченістю 0,92 та для найжаркішої доби забезпеченістю 0,95 (для м. Києва -22 °C і +35 °C відповідно). Тому для визначення питомої річної енерговитрати цими системами потрібно було зробити перерахунок для середніх температур за наступною формулою:

$$Q_{\text{ОВіК}}^{\text{сп}} = Q_{\text{ОВіК}}^{\text{р}} \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{ср.ОВіК}}}{t_{\text{в}} - t_{\text{р.ОВіК}}}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{ОВіК}}^{\text{р}}$ - розрахункова витрата теплоти на вентиляцію, опалення чи кондиціонування будівель і споруд, що визначаються за $t_{\text{р.ОВіК}}$, Вт; $t_{\text{ср.ОВіК}}$ - середня температура зовнішнього повітря за період, °С.

Визначення годин опалювального періоду здійснювалося з урахуванням наступних умовностей: з листопада по березень опалення постійне, а в жовтні та квітні тривалість годин опалювального періоду становить половину тривалості цих місяців. В цей проміжок системи вентиляції та опалення працюють на обігрів, а в іншій решті року системи вентиляції та кондиціонування - на охолодження.

Також було прийнято до уваги графік використання приміщень, за якого навчальний та робочий процес триває з 8:00 до 18:00. В цей період дня в аудиторіях підтримується результуюча температура на рівні 20°C, а в нічний час та у вихідні дні температура чергового режиму опалення знижується до 16 °С.

Для системи вентиляції було підібрано припливно-витяжну вентиляцію з роторним теплообмінником, фреоновим охолодженням та підігрівом зовнішнього повітря. Система кондиціонування містить зовнішні та внутрішні каналні блоки. Після цього проведено розрахунок споживання електричної енергії системами ОВіК для забезпечення нормованих параметрів мікроклімату в приміщеннях.

Отримані дані порівняно із генерацією електричної енергії дахової СЕС, встановленої на даху 22 корпусу [24,25] та представлено графічно на рис. 5.

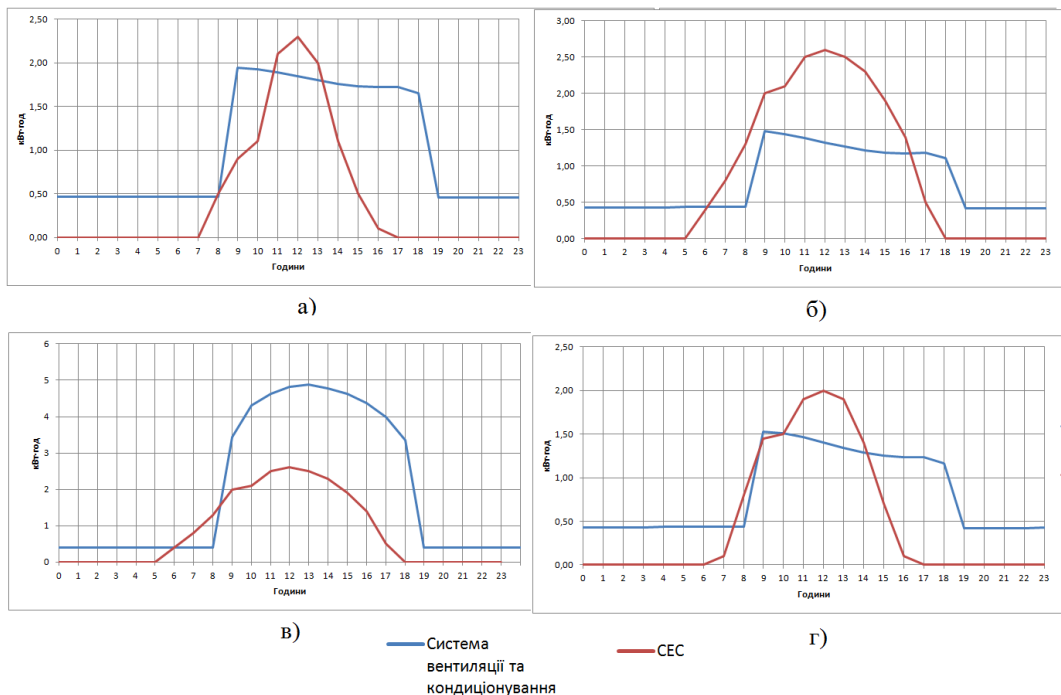


Рисунок 5 – Графік генерації електричної енергії СЕС та споживання електричної енергії системою вентиляції та кондиціонування у а) лютому; б) квітні; в) червні; г) жовтні

Проаналізувавши отримані графіки, бачимо перевищення генерації СЕС над споживанням електричної енергії системами вентиляції та кондиціонування у весняний період, а також часткове перевищення у зимовий та осінній період. В літні місяці СЕС зменшує пікове навантаження системи на 50%.

Для вирішення цієї проблеми потрібно використати системи накопичення енергії для створення балансу між попитом та пропозицією, що і було передбачено у принциповій схемі. Акумуляування енергії забезпечить підвищення надійності електропостачання та полегшення інтеграції ВДЕ в систему енергозабезпечення.

Висновки

В роботі було проведено аналіз ефективності систем енергозабезпечення, і було встановлено, що більша частина енергії, яка використовується для опалення, вентиляції та кондиціонування, продовжує вироблятися з викопного палива. Тому підвищення енергоефективності систем енергозабезпечення є

однією з важливих стратегій уповільнення зростання попиту та пом'якшення негативного впливу на здоров'я, економіку та навколишнє середовище. Встановлено що, відновлювана енергія відіграватиме фундаментальну роль у декарбонізації енергії набуває поширеного застосування в комбінації з системами опалення, вентиляції та кондиціонування.

Також здійснено проектування системи вентиляції та кондиціонування з врахуванням річного енергоспоживання навчальних аудиторій корпусу №22 КПІ ім. Ігоря Сікорського. Представлено результати моделювання роботи сонячної електростанції та проведено порівняння отриманих даних з реальними значеннями генерації електричної енергії.

Встановлено, що генерація СЕС у порівнянні з режимом роботи систем вентиляції та кондиціонування відбувається синхронно, що призводить до зменшення експлуатаційних витрат та пікового навантаження корпусу. Тому запропонована інтегрована система енергозабезпечення із застосуванням вентиляційних систем дозволить підвищити надійність системи електропостачання та ефективність її роботи.

Список використаної літератури

1. Winzer C. Conceptualizing energy security. *Energy Policy*, 2012, vol. 46, issue C. – P. 36-48.
2. International Energy Agency, *World Energy Statistics and Balances 2020* (database), IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>
3. U.S. Energy Information Administration. 2018 Commercial Buildings Energy Consumption Survey Preliminary Results. URL: <https://www.eia.gov/consumption/commercial/>
4. U.S. Energy Information Administration. Energy use in homes. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/homes.php>.
5. Дешко В. І. Моніторинг температурного стану навчального корпусу / В. І. Дешко, І. Ю. Білоус // *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. – 2015. – № 2 (40). – С. 22–29.
6. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2017. №4. С. 67-73.
7. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>
8. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2013. 240 с.
9. ASHRAE 62.1–2019 «Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality». URL: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2019
10. R. Li, W. Wei, S. Mei, Q. Hu, and Q. Wu, "Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: An MPEC approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, DOI: 10.1109/TSG.2018.2833279, in press, 2018.
11. Leibowicz, B. D., Lanham, C. M., Brozynski, M. T., Vázquez-Canteli, J. R., Castejón, N. C., & Nagy, Z. (2018). Optimal decarbonization pathways for urban residential building energy services. *Applied energy*, 230. – P. 1311-1325.
12. Концепція реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії: розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 січня 2020 р. № 88-р.
13. Шляхи підвищення енергоефективності будівель в країнах ЄС та в Україні / А. М. Карюк, О. Б. Кошлатий, Т. В. Львовська, В. А. Пашинський // *Technology, engineering and science – 2018 : I міжнар. наук.-практ. конф.*, Лондон, 24-25 жовтня 2018 р. – Лондон : ПолтНТУ, 2018. – С. 19-21.
14. Бараннік В.О. Енергоефективність регіонів України: проблеми, оцінки та наявний стан / Регіональний філіал Національного інституту стратегічних досліджень у м. Дніпро. – 2017. – 26 с. – [Електронний ресурс]: – URL: <http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/energoefekt-5secc.pdf>
15. Демченко В.В., Чуприна Х.М., О.В. Невмержицький О.В. Методи підвищення енергоефективності будівлі [Електронний ресурс]: – URL.: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp2017/paper/view/2664/2042>
16. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Буяк Н. А. (2019). Вплив переривчастих режимів опалення на динаміку енергопотребити та умови комфортності будівель із різним рівнем теплового захисту. *Наукові вісті КПІ: міжнародний науково-технічний журнал*, 2019, № 4 (126).
17. Карпенко, В. О. "Регулювання продуктивності вентиляційних установок за рахунок зміни частоти обертання електродвигуна " Матеріали науково-технічної конференції студентів та магістрантів Таврійського державного агротехнологічного університету. Випуск XI. Том II.-Мелітополь: ТДАТУ, 2012.- 318 с. (2012).

18. Губина И.А., Горшков А.С. Энергосбережение в зданиях при утилизации тепла вытяжного воздуха. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 209 - 219.
19. Xiao F, Wang S. Progress and methodologies of lifecycle commissioning of HVAC systems to enhance building sustainability. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:1144–9.
20. Federal Energy Management Program (FEMP). Continuous Commissioning Guidebook for Federal Managers. 2013. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.7173&rep=rep1&type=pdf>
21. Веремійчук Ю.А., Опришко В.П., Притискач І.В., Ярмолюк О.С. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів. Київ, Видавничий дім «Кий», 2020. 186 с. ISBN 987-617-7177-12-7.
22. Veremiichuk, Y., Prytyskach, I., Yarmoliuk, O., Opryshko, V. Energy Hub Function Optimization Models During Ukrainian Energy Resources Market Liberalization. *Power and Electrical Engineering*. Vol.34, 2017, pp.49-52. ISSN 2256-0238. e-ISSN 2256-0246. Available from: doi:10.7250/pee.2017.009.
23. Yurii Veremiichuk, Ivan Prytyskach, Olena Yarmoliuk and Vitalii Opryshko “Energy sources selection for industrial enterprise combined power supply system” 2019 IEEE 6th International conference on energy smart systems. Kyiv, Ukraine.
24. Веремійчук Ю.А. Степаненко В.А., Експериментальне дослідження ефективності генерації дахової СЕС корпусу №22. XII Науково-технічна конференція Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Енергетика. Екологія. Людина 7-8 травня 2020 року С. 144-150.
25. Степаненко, В. А. Інтегрована система енергозабезпечення із застосуванням вентиляційних систем : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Степаненко Віталій Анатолійович. – Київ, 2020. – 108 с.

V. Stepanenko, Master, ORCID 0000-0001-6176-589X
Y. Veremiichuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0258-0478
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

INTEGRATED ENERGY SUPPLY SYSTEM WITH THE USE OF VENTILATION SYSTEMS

The implementation of an integrated energy supply system is an effective way to increase energy efficiency, reduce CO2 emissions and increase the use of renewable energy, as well as provide opportunities for energy production, conversion and storage in interconnected infrastructures for energy system operators and consumers. Also, increasing the level of energy efficiency of the energy supply system is one of the important strategies to slow down the growth of demand and mitigate the negative impact on health, the economy and the environment. The article considers the integrated use of energy, the introduction of energy hubs as part of future energy networks and proposes a schematic diagram of an integrated energy supply system. The article presents the results of modeling and computational experiment of ventilation and air conditioning systems in the integrated power supply system, taking into account the technical and operational characteristics of SES, regulatory and technical documents and building codes. According to the results of the study, it is established that the schedule of SES generation and the schedule of electricity consumption by ventilation and air conditioning systems are similar, which leads to a reduction in operating costs and a reduction in the load on the building's power supply system. The scientific substantiation of the integration of the energy storage system into the energy supply structure has been further developed, which will ensure the reliability of the power supply and the efficiency of the solar power plant.

Keywords: energy hub, multi-energy system, renewable energy source, energy storage, combined system, electricity generation, ventilation and air conditioning system.

REFERENCES

1. Winzer C. Conceptualizing energy security. *Energy Policy*, 2012, vol. 46, issue C. – P. 36-48.
2. International Energy Agency, World Energy Statistics and Balances 2020 (database), IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>
3. U.S. Energy Information Administration. 2018 Commercial Buildings Energy Consumption Survey Preliminary Results. URL: <https://www.eia.gov/consumption/commercial/>
4. U.S. Energy Information Administration. Energy use in homes. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/homes.php>.
5. Deshko V. I. Monitorynh temperaturnoho stanu navchalnoho korpusu / V. I. Deshko, I.U. Bilous// Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia : naukovyi zhurnal. – 2015. – № 2 (40). – P. 22–29.

6. Deshko V.I., Bilous I.U., Hetmanchuk H.O. Bazy klimatohii dlia vyznachennia enerhetychnykh kharakterystyk budivel. Naukovyi zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia». 2017. №4. P. 67-73.
7. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>
8. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia. [Chynnnyi vid 2014-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv, 2013. 240 p.
9. ASHRAE 62.1-2019 «Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality». URL: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2019
10. R. Li, W. Wei, S. Mei, Q. Hu, and Q. Wu, "Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: An MPEC approach," IEEE Trans. Smart Grid, DOI: 10.1109/TSG.2018.2833279, in press, 2018.
11. Leibowicz, B. D., Lanham, C. M., Brozynski, M. T., Vázquez-Canteli, J. R., Castejón, N. C., & Nagy, Z. (2018). Optimal decarbonization pathways for urban residential building energy services. Applied energy, 230. – P. 1311-1325.
12. Kontseptsiiia realizatsii derzhavnoi polityky u sferi zabezpechennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel u chastyni zbilshennia kilkosty budivel z blyzkym do nulovoho rivnem spozhyvannia enerhii: rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 29.01.2020 r. № 88-r.
13. Shliakhy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivel v krainakh YeS ta v Ukraini / A. M. Kariuk, O. B. Koshlatyi, T. V. Lvovska, V. A. Pashynskiy // Technology, engineering and science – 2018 : I mizhnar. nauk.-prakt. konf., London, 24-25.10 2018. – London : PoltNTU, 2018. – P. 19-21.
14. Barannik V.O. Enerhoefektyvnist rehioniv Ukrainy: problemy, otsinky ta naiavnyi stan / Rehionalnyi filial Natsionalnogo instytutu stratehichnykh doslidzhen u m. Dnipro. – 2017. – 26 p. – [Elektronnyi resurs]: – URL: <http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/energoefekt-5cecc.pdf>
15. Demchenko V.V., Chupryna Kh.M., O.V. Nevmerzhytskyi O.V. Metody pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivli [Elektronnyi resurs]: – URL.: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp2017/paper/view/2664/2042>
16. Deshko V. I., Bilous I. U., Buiak N. A. (2019). Vplyv pereryvchastykh rezhymiv opalennia na dynamiku enerhopotreby ta umovy komfortnosti budivel iz riznym rivnem teplovoho zakhystu. Naukovi visti KPI: mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal, 2019, № 4 (126).
17. Karpenko, V. O. "Rehuliuвання продуктивності вентиляційних установок за рахунок зміни частоти обертання електродвигуна " Матеріали науково-технічної конференції студентів та магістрантів Таврійського державного ахротехнологічного університету. Випуск KhI. Том II.-Melitopol: TDATU, 2012.-318 p. (2012).
18. Hubyna Y.A., Horshkov A.S. Enerhosberezhennya v zdaniakh pry utylyzatsiyi tepla vitiazhnogo vozdukhа. // Stroytelstvo unykalnikh zdaniy i sooruzheniy. 2015. № 4 (31). P. 209 - 219.
19. Xiao F, Wang S. Progress and methodologies of lifecycle commissioning of HVAC systems to enhance building sustainability. Renew Sustain Energy Rev 2009;13:1144–9.
20. Federal Energy Management Program (FEMP). Continuous Commissioning Guidebook for Federal Managers.2013. URL:<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.7173&rep=rep1&type=pdf>
21. Veremiichuk Y.A., Opryshko V.P., Prytyskach I.V., Yarmoliuk O.S. Optyimizatsiia funktsionuvannia intehrovanykh system enerhozabezpechennia spozhyvachiv. Kyiv, Vydavnychiy dim «Kyі», 2020. 186 p. ISBN 987-617-7177-12-7.
22. Veremiichuk, Y., Prytyskach, I., Yarmoliuk, O., Opryshko, V. Energy Hub Function Optimization Models During Ukrainian Energy Resources Market Liberalization. Power and Electrical Engineering. Vol.34, 2017, pp.49-52. ISSN 2256-0238. e-ISSN 2256-0246. Available from: doi:10.7250/pee.2017.009.
23. Yurii Veremiichuk, Ivan Prytyskach, Olena Yarmoliuk and Vitalii Opryshko "Energy sources selection for industrial enterprise combined power supply system" 2019 IEEE 6th International conference on energy smart systems. Kyiv, Ukraine.
24. Veremiichuk Y.A. Stepanenko V.A., Eksperymentalne doslidzhennia efektyvnosti heneratsii dakhovoi SES korpusu №22. KhII Naukovo-tekhnichna konferentsiia Instytutu enerhozbezpechennia ta enerhomenedzhmentu Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna 7-8.12. 2020. P. 144-150.
25. Stepanenko, V. A. Intehrovana systema enerhozabezpechennia iz zastosuvanniam ventyliatsiinykh system : mahisterska dys. : 141 Elektroenerhetyka, elektrotehnika ta elektromekhanika» / Stepanenko Vitalii Anatoliiovych. – Kyiv, 2020. – 108 p.

Надійшла 03.12.2020
Received 03.12.2020

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 519.233.6:621.314.212

А.В. Волошко, д-р. техн. наук, ORCID 0000-0003-3337-****,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Я.С. Бедерак, к.т.н, пров. інженер ПАК «АЗОТ», ORCID 0000-0002-2669-0965
В.В. Шевчук, аспірант, ORCID 0000-0003-0535-2630
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Мета публікації - використати методи теорії подібності для контролю електроспоживання на промислових підприємствах. На підставі п'ятого додаткового положення теорії подібності запропоновано застосувати стохастичні характеристики добових графіків електричного навантаження трансформаторних підстанцій. Розроблено наближений метод розрахунку коефіцієнта подібності як добових графіків електричного навантаження один з одним, так і обраного добового графіка з заявленим графіком на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку». Такий метод можливо використовувати на вибірках витрат різних енергоресурсів.

Ключові слова: електричне навантаження, добовий графік, теорія подібності, коефіцієнт подібності.

Вступ. З 01.07.2019 р запроваджено продаж електроенергії на промислових підприємствах (ПП) на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку» [1], що вимагає постійного контролю електроспоживання з боку електрослужби підприємства.

Електроенергію ПП купують або у Оператора ринку, або на біржі.

Ціна електроенергії для промислового підприємства C розраховується за формулою [2]:

$$C = x \cdot p + (x - pr) \cdot p_+ \cdot I_{(x-pr)>0} + (pr - x) \cdot p_- \cdot I_{(x-pr)<0} + P + V,$$

де x - фактичне споживання електроенергії підприємством за годину, кВтг; pr - заплановане споживання підприємства, кВтг; p - ціна на електроенергію на ринку на добу вперед, грн / кВтг; p_+ - ціна на електроенергію на ринку при перевищенні фактичного споживання над запланованим, грн / кВтг; p_- - ціна на електроенергію на ринку при перевищенні запланованого споживання над фактичним, грн / кВтг; P - втрати електроенергії на підприємстві між межею балансового розділу та місцем установки приладів обліку, кВтг; V - вартість послуг постачальника електроенергії, грн; I - функція Хевісайда ($I = 0$ при $x-pr < 0$ і $I = 1$ при $x-pr \geq 0$ для виразу з p_+ ; $I = 1$ при $x-pr < 0$ і $I = 0$ при $x-pr \geq 0$ для виразу з p_-).

Купівля електроенергії на «Ринку подового наперед і внутрішньодобовому ринку» має ряд особливостей:

1. Якщо електроенергії погодинно замовлено більше, ніж спожито, то неспожиту електроенергію викупають у ПП за ціною набагато меншою, ніж замовило її підприємство заздалегідь.

2. Якщо електроенергії погодинно замовлено менше, ніж спожито, то необхідну додаткову електроенергію купують за ціною в кілька разів більше, ніж замовило її ПП спочатку.

Таким чином, споживачі електроенергії стикаються з двома видами небалансу:

1. Позитивний небаланс – якщо обсяг спожитої електричної енергії споживачем є меншим, ніж замовлений у постачальника. У такому випадку Оператор ринку викупить у постачальника неспожиту електричну енергію, але дешевше, ніж ціна закупівлі. Таким чином, споживач заплатить за електричну енергію, яку не витратив.

2. Негативний небаланс – якщо обсяг спожитої електричної енергії споживачем більший, ніж замовлений у постачальника.

© А.В. Волошко, Я.С. Бедерак, В.В. Шевчук, 2020

У цьому випадку постачальник буде зобов'язаний купити електричну енергію, яка була витрачена більше замовленого обсягу. Ціна буде вище, ніж ціна закупівлі. Зрозуміло, що такі витрати постачальник буде переводити на споживача, який допустив небаланс.

Задля уникнення таких ситуацій особливу роль відіграє контроль погодинного добового електроспоживання на підприємстві.

Графіки навантаження по своїй суті є реалізацією випадкових процесів, тому для їх аналізу та порівняння найбільш підходять критерії стохастичної подібності [3]. Це відноситься до п'ятого, додаткового положення про подібність імовірнісних об'єктів, коли критерії подібності утворюються з числових характеристик змінних випадкових процесів [4].

За отриманими значеннями статистичного ряду будується залежність щільності розподілу випадкової величини. Критерії подібності, отримані в результаті обробки випадкових величин, також носять ймовірні ознаки і повного збігу оцінок бути не може. В цьому випадку слід розглядати їх з точки зору ймовірності подібності. При повному збігу критеріїв подібності π фігури щільності розподілу $f(\pi)$ (рис. 1) для об'єктів порівняння мають повний збіг і загальна площа має максимальну величину [3]. Можливо прийняти за $f(\pi)$ графік електричного навантаження. Кожен погодинний графік електричного навантаження за певну добу як об'єкт порівняння характеризується середнім арифметичним значенням 24 погодинних значень m (математичним очікуванням) і середньоквадратичним відхиленням σ за той же період часу.

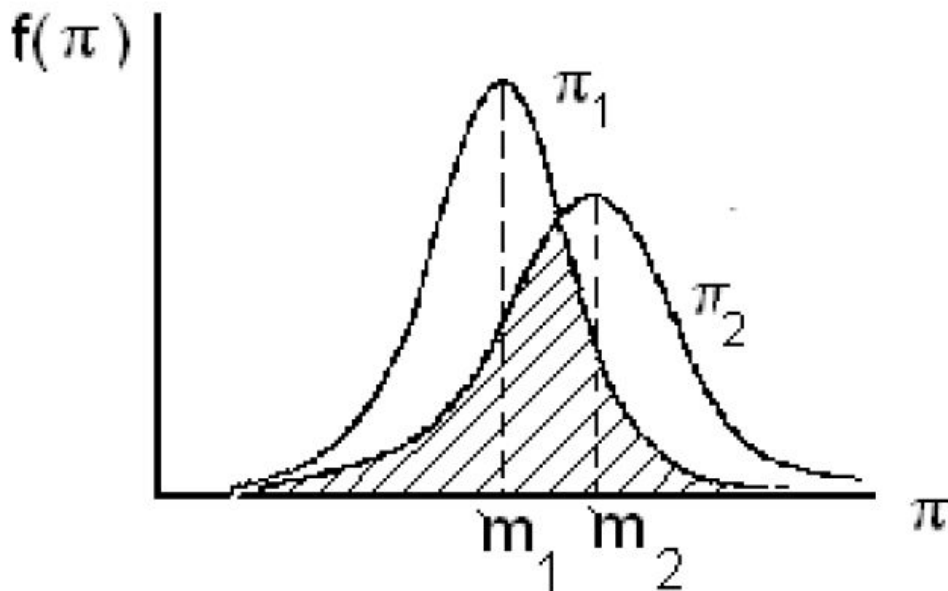


Рисунок 1– Щільності розподілу оцінок подібності π_1 і π_2 порівнюваних графіків електричних навантажень за різний період часу

При неповній (імовірнісній) подібності ймовірність подібності визначається як відношення загальної, що збігається, площі фігур до площі однієї з них. В якості критеріїв подібності на приєднаннях силових трансформаторів можливо використовувати як коефіцієнт завантаження, так і погодинні усереднені значення потужності за кожну годину доби.

Мета та задачі. Метою даної роботи є апробація використання методів подібності для контролю погодинних добових графіків електроспоживання промислового підприємства (ПП) в умовах купівлі електроенергії на «Ринку подобово наперед і внутрішньодобовому ринку».

Матеріал і результати досліджень. Для застосування методів теорії подібності використовуються добові вибірки (графіки електричної завантаження) з інтервалом опитування 1 година на введенні 6 кВ силового трансформатора тип ТДН-10000/110/6, встановленого на підстанції 110/6 кВ для електропостачання насосної станції очистки промислових стічних вод обласного центру. Облік електроенергії забезпечується електронним лічильником електроенергії. Облікові середньогодинні дані за 7 днів листопада місяця 201... року зведені в табл. 1. У цій само таблиці наведені значення

середньодобового навантаження, середнє відхилення СКО, мінімального і максимального значення навантаження P на добу за ті самі періоди часу.

Таблиця 1 – Зведені погодинні значення електроспоживання P на введенні трансформатора ТДН 10000/110 в кВт

Часовий інтервал	День тижня						
	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця	Субота	Неділя
1	2	3	4	5	6	7	8
0 - 1	2188	2216	2196	2190	2164	2279	2256
1 - 2	2174	2207	2180	2203	2155	2255	2246
...
10 - 11	2188	2233	2196	2176	2216	2316	2285
11 - 12	2189	2238	2204	2216	2204	2325	2278
12 - 13	2190	2219	2220	2194	2207	2299	2276
...
21 - 22	2237	2224	2233	2221	2310	2258	2255
22 - 23	2219	2219	2206	2183	2305	2266	2230
23 - 24	2216	2210	2239	2190	2309	2275	2210
Споживання за добу, кВт год	52725	53248	53001	53027	53336	54954	54038
Середнє значення за добу P , кВт	2196,9	2218,7	2208,4	2209,5	2222,3	2289,8	2251,6
СКО, кВт	25,8	13,6	24,8	24,0	42,2	19,7	18,3
Мінімальне значення P , кВт	2153	2196	2168	2176	2155	2255	2210
Максимальне значення P , кВт	2237	2242	2270	2246	2310	2325	2288

Щоб визначити подібність добових графіків навантаження, необхідно розрахувати щільність розподілу, але по 24 значенням це зробити складно. Тому пропонується наступний метод.

Для визначення числа інтервалів (кишень) необхідно поділити кожен добову вибірку з 24 значень на \sqrt{n} , де n -число значень в добовій вибірці. Для розглянутого випадку необхідно поділити всю вибірку на $\sqrt{24}$ (≈ 5) інтервалів (кишень), починаючи з мінімального значення з усіх мінімальних значень добових вибірок і закінчуючи максимальним значенням з усіх максимальних значень. Тоді значення кишень будуть наступні: 2190; 2225; 2260; 2295; 2325. Після цього з'являється можливість розрахувати ступінь подібності двох або декількох графіків один з одним, використовуючи функцію «ЧАСТОТА» в програмі «Microsoft Excel» (табл. 2).

Таблиця 2 – Визначення частоти потрапляння навантаження в інтервали (кишені)

Кишені	Інтервали навантаження, кВт	Кількість значень навантаження, що потрапили в інтервал в кожен з днів тижня						
		1 доба	2 доба	3 доба	4 доба	5 доба	6 доба	7 доба
1	<2190	14	0	6	9	4	0	0
2	2190-2225	5	16	13	8	11	0	1
3	2225-2260	5	8	4	7	5	2	17
4	2260-2295	0	0	1	0	1	10	6
5	2295-2325	0	0	0	0	3	12	0

Далі необхідно порахувати загальну кількість значень навантаження в кожному інтервалі. Це дозволить наближено визначити коефіцієнт подібності між добовими графіками навантаження (табл. 3). Якщо на введенні заявлена потужність для роботи в «Енергоринку» прийнята наприклад за 2200 кВт, то

можливо також отримати значення коефіцієнта подібності $K_{\text{подібності}}$ обраного добового графіка з заявленим (наприклад, за першу добу з заявленим 1-3 або за другі з заявленим 2-3).

Таблиця 3 – Розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленими графіками навантаження

-	Число загальних інтервалів у добових графіках навантаження							
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-3	2-3
Загальна кількість значень погодинного навантаження K_o	10	15	19	14	2	6	5	16
Кількість погодинних значень	24	24	24	24	24	24	24	24
$K_{\text{подібності}} = K_o/24$	0,42	0,63	0,79	0,58	0,08	0,25	0,21	0,67

Загальна кількість значень погодинного навантаження в кожен інтервал між вибірками за першу та другу добу визначається наступним чином: в перший інтервал (кишень) перевіряється кількість загальних значень по табл. 2 (у першого графіка їх 14, у другого 0, загальна кількість - 0); в другий інтервал виконується та ж процедура (у першого графіка 5, у другого 16, загальна кількість - 5); в третій інтервал (у першого графіка 5, у другого 8, загальна кількість - 5); в четвертий і п'ятий інтервали по 0. Таким чином, загальна кількість значень навантаження, що потрапили в добову вибірку, між першими і другими цілодобово - 10). Інші дані в табл. 3 отримані аналогічно.

У таблиці наведено також значення коефіцієнтів подібності.

При бажанні збільшити точність при розрахунку коефіцієнтів подібності необхідно збільшити кількість інтервалів навантаження (кишень). У табл. 4 наведено розрахунок частоти потрапляння навантаження в 9 інтервалів (кишень).

Таблиця 4 – Визначення частоти попадання навантаження в 9 інтервалів (кишень)

Кишені	Інтервали навантаження, кВт	Кількість значень навантаження, що потрапили в інтервал в кожен з днів тижня						
		1 доба	2 доба	3 доба	4 доба	5 доба	6 доба	7 доба
1	<2190	14	0	6	9	4	0	0
2	2190-2207,5	1	5	7	3	6	0	0
3	2207,5-2225	4	11	6	5	5	0	1
4	2225-2242,5	5	8	3	4	4	0	6
5	2242,5-2260	0	0	1	3	1	2	11
6	2260-2277,5	0	0	1	0	1	6	3
7	2277,5-2295	0	0	0	0	0	4	3
8	2295-2312,5	0	0	0	0	3	9	0
9	2312,5-2325	0	0	0	0	0	3	0

У табл. 5 наведено розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленими графіками навантаження при розподілі графіка навантаження на 9 інтервалів.

Таблиця 5 – Розрахунок коефіцієнтів подібності між добовими або заявленими графіками навантаження при розподілі графіка навантаження на 9 інтервалів

-	Число загальних інтервалів у добових графіках навантаження							
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-3	2-3
Загальна кількість значень погодинного навантаження K_o	10	14	18	13	0	6	1	5
Кількість погодинних значень	24	24	24	24	24	24	24	24
$K_{\text{подібності}} = K_o/24$	0,42	0,58	0,75	0,54	0,00	0,25	0,04	0,2

Чим більша кількість інтервалів, тим точніше можливо визначити коефіцієнт подібності.

Таким чином, алгоритм роботи методу розрахунку коефіцієнта подібності обраних добових графіків навантаження має наступний вигляд:

1. Обираються дві рівні за тривалістю добові вибірки.
2. Кожна добова вибірка ділиться на рівні (або не рівні) інтервали, число яких \sqrt{n} в загальному випадку, де n - число значень добової вибірки.
3. Розраховується частота потрапляння добового графіка навантаження в кожен з інтервалів (кишень).
4. Підраховується загальне значення навантаження за кожен інтервал порівнюваних добових вибірок і за добу.
5. Розраховується коефіцієнт подібності як співвідношення загального значення навантаження на добу за обраними графіками навантаження до числа значень у вибірці.

Необхідно відзначити, що запропонований метод дозволяє визначити ступінь подібності не тільки двох або декількох добових погодинних або півгодинних графіків електричного навантаження один з одним, але і місячних добових, річних щомісячних.

Такий метод можна застосовувати також для різних графіків споживання енергоресурсів, як добових, так і з іншою тривалістю у часі.

Висновки

1. Вперше застосований метод теорії подібності для контролю погодинних добових графіків електроспоживання промислового підприємства, який дозволяє визначити ступінь подібності двох або декількох графіків електричного навантаження один з одним або з заявленим на «Енергоринку» графіком, або з еталонним. Визначення ступеня подібності різних графіків може бути корисним для контролю якості роботи технологічного або виробничого персоналу.

2. Розроблено алгоритм розрахунку коефіцієнта подібності кількох обраних добових графіків навантаження один з одним або з заявленим на «Ринку подобою наперед і внутрішньодобового ринку» графіком навантаження, або з еталонним графіком.

3. Даний метод при необхідності можливо поширити не тільки на добові вибірки електроспоживання, а й на вибірки іншої тривалості у часі (місячні щодобові, річні щомісячні).

4. Запропонований спосіб визначення коефіцієнта подібності добових графіків навантаження можливо поширити і на вибірки витрат інших енергоресурсів, вироблення продукції.

Список використаної літератури

1. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Затвержені Постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 308 (у редакції постанови НКРЕКП від 24.06.2019 № 1169).

2. Трофимова В.Ш., Ліпатніков А.В. Розробка методики планування погодинного споживання електричної навантаження великим металургійним підприємством. Вісник МГТУ ім. Г. І. Носова. 2014. №3. С. 57-62.

3. Камінський А.В. Застосування методів теорії подібності для аналізу роботи трансформаторних підстанцій. Інтернет-журнал «наукознавство». Том 7, №2 (2015).

URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN215.pdf> (доступ вільний). DOI: 10.15862 / 45TVN215 (дата Звернення 24.12.2020).

4. Веніков В.А. Теорія подібності і моделювання. Москва: Вища школа, 1976. 480 с.

A. Voloshko, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-3337-******,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
J. Bederak, Ph.D. tech. Science, **ORCID 0000-0002-2669-0965**
lane engineer of PJSC "NITROGEN"
V. Shevchuk, PhD – student, **ORCID 0000-0003-0535-2630**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF THE THEORY OF SIMILARITY TO CONTROL ELECTRIC CONSUMPTION INDUSTRIAL ENTERPRISES

The purpose of the publication is to use the methods of the similarity theory to control power consumption in industrial enterprises. On the basis of the fifth additional provision of the theory of similarity, it is proposed to apply the stochastic characteristics of the daily graphs of the electrical load of transformer substations. An approximate method for calculating the coefficient of similarity of both daily schedules of electrical load with each

other and the selected daily schedule with the declared schedule on the "Daily market in advance and intraday market" has been developed. This method can be used when choosing the consumption of various energy resources.

Keywords: *electrical load, daily schedule, theory of similarity, coefficient of similarity.*

REFERENCES

1. The rules of the market are "do it ahead" and the internal market is similar. Approved by the Resolution of the NKREKP dated March 14, 2018 No. 308 (at the editorial office of the NKREKP Resolution dated June 24, 2019 No. 1169).

2. Trofimova V.Sh., Lipatnikov A.V. Development of a methodology for planning the hourly consumption of electrical load by a large metallurgical enterprise. Vestnik MGTU im. G.I. Nosov. 2014. No. 3. S. 57–62.

3. Kaminsky A.V. Application of similarity theory methods for analyzing the operation of transformer substations. Online magazine "Science". Volume 7, No. 2 (2015).

URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN215.pdf> (free access). DOI: 10.15862 / 45TVN215 (date 24.12.2020).

4. Venikov V.A. Similarity theory and modeling. Moscow: Higher School, 1976.480 p.

Надійшла 15.12.2020

Received 15.12.2020

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.3.015.2

В.П. Грудська, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7775-6397
В.І. Чибеліс, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2235-9826
В.Ю. Лободзинський, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1167-824X
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА- СТАБІЛІЗАТОРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА

В роботі представлені результати дослідження автоматичного регулятора стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора. Удосконалення системи управління автономного інвертора дозволило підвищити точність стабілізації вихідної напруги інвертора, що дало можливість спростити налаштування системи управління для легкого узгодження з іншими програмними елементами. Шляхом введення цифрової форми задання уставки стабілізованої напруги і цифрової форми порівняння з опорною напругою досягнуто високу точність стабілізації напруги, яка за відсутністю аналогової ланки не залежить від вибору і ретельного налаштування елементів, що визначається стабільністю генератора напруги і шириною зони чутливості. Дослідження показали, що регулювання напруги перетворювача здійснюється зміною установки рівня, пов'язаною зі зсувом зони нечутливості. Швидкість відпрацювання заданого кута регулювання залежить від частоти слідування імпульсів генератора, яка обмежується тільки частотними властивостями інтегральних мікросхем. А при рівності частот генераторів імпульсів, мінімальній ширині зони нечутливості і зміні навантаження від номінального до неробочого ходу точність стабілізації вихідної напруги інвертора склала 0,5 %.

Ключові слова: автономний інвертор, стабілізація, вихідна напруга, автоматичне регулювання, фазо-імпульсне управління.

Вступ. Ефективність споживання електроенергії в значній мірі залежить від функціонування перетворювачів змінної і постійної напруги, які розповсюджені практично в усіх електротехнічних галузях. Використання електричної енергії в різних областях техніки пов'язано з оптимальними умовами її генерації, передачі та розподілу. Для найбільш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають споживання її з нестандартними параметрами. Тому між джерелом енергії та споживачем необхідні перетворювачі електроенергії. Найбільш поширеною областю споживання електроенергії є електропривод. Імпульсна модуляція і цифрові засоби керування дозволяють перевести керування асинхронним двигуном на принципово новий рівень, при якому можливо керування як швидкості, так і моменту асинхронного двигуна, наближаючи його за властивостями керованості до двигуна постійного струму. Ефективне керування асинхронним двигуном дозволяє отримати великий економічний ефект від енергозбереження за рахунок оптимального керування. Створення напівпровідникових приладів великої потужності, які працюють в ключових режимах, мають повну керованість і високу швидкодію, дозволило дискретно керувати потоками електричної енергії великої потужності на підвищених частотах за потрібними законами. Пристрої, побудовані на цих приладах, застосовуються в різних областях техніки і мають при передачі та споживанні електроенергії нові функціо-

нальні можливості, менші втрати електроенергії, дозволяють підвищити її якість, а також успішно вирішувати екологічні питання [1].

У наш час силові перетворювальні пристрої широко використовують у кольоровій металургії та хімічній промисловості, на залізничному та міському транспорті, для живлення контактних мереж гірничорудного та інших видів промислового транспорту, у різних галузях промисловості: для регульованих електроприводів, збудження електричних машин, для зарядження акумуляторів, електрозварювання, гальванотехніки, електроерозійної обмотки металів, для високовольтних ліній електропередач постійного струму, у джерелах вторинного електроживлення електронної апаратури та ін.

Основними областями застосування пристроїв сигової електроніки, в яких вони дають найбільший економічний ефект, зараз є: засоби регулювання виробності технологічних кіл ТЕС і ГЕС (скорочення енерго споживання на власні потреби, що призводить до зниження собівартості 1 кВт·год); промисловий електропривод, який керується за допомогою напівпровідникового перетворювача електроенергії; комунальне господарство, вуличне освітлення натрієвими лампами високого тиску з електронною пускорегульовальною апаратурою, освітлення громадських приміщень компактними люмінісцентними лампами щ електронним баластом; підвищення ефективності джерел вторинного електроживлення за рахунок використання імпульсних способів перетворення електроенергії; автомобільна електроніка; побутова техніка [2].

Якість і точність підтримання рівня і форми вихідного параметру напруги і струму таких перетворювачі визначається не тільки функціональними можливостями сигової частини, але й оптимальним алгоритмом і швидкістю системи управління (СУ). Сучасні цифрові СУ реалізують будь-який алгоритм керування ключами (тиристорами, транзисторами) і забезпечують їхню надійну роботу в усіх режимах. Більшість відомих цифрових СУ містить аналогову ланку, в якій виконується порівняння вихідної напруги з опорною і інформація про результат порівняння видається в аналоговій формі, що ускладнює її спряження з сучасними цифровими пристроями програмованого управління [3].

Мета та завдання. Удосконалення системи управління автономного інвертора шляхом введення цифрової форми завдання уставки стабілізованої напруги і цифрової форми порівняння з опорною напругою, що підвищує точність стабілізації вихідної напруги інвертора, суттєво спрощує налаштування системи управління і дозволяє легко узгоджувати її з іншими програмними елементами.

Матеріали і результати досліджень. Автоматичний регулятор-стабілізатор входить у систему управління автономного інвертора (Рис. 1), вихідна напруга якого регулюється шляхом фазового зсуву між моментами вступу у роботу окремих груп вентилів (регулювання кута управління α).

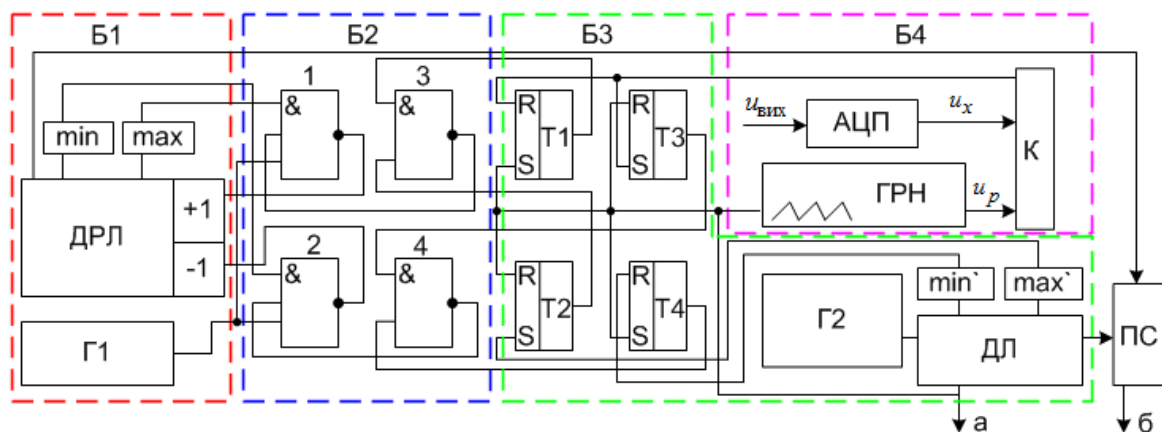


Рисунок 1 – Блок схема автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора

За фазо-імпульсного способу управління найбільш доцільною є побудова регулятора за принципом три зонності, сутність якого полягає в наступному: значення вхідної напруги інвертора задається двійковим кодом у двійковий реверсивний лічильник (ДРЛ) фазо зсувного пристрою СУ. У регуляторі періодично формується зона нечутливості з чітко визначеними границями «менше» і «більше» (періодичність формування такої зони визначається дискретним характером роботи вентилів). Компаратор порівнює вихідну напругу інвертора з пілкоподібною опорною напругою і видає відповідний сигнал. Якщо цей сигнал попадає у зону нечутливості, то вихідна напруга приймає значення «норма» і регулювання не потрібне, якщо сигнал компаратора з'являється за межами зони чутливості, то значення вихідної напруги «менше» або «більше» допустимого і регулятор видає команду на корегування кута керування α .

Зміна кута α , тобто двійкового числа в ДРЛ, здійснюється подачею імпульсної послідовності на один із його входів (прямий або зворотній). Одночасне управління обома входами ДРЛ неможлива і рівноцінне відсутності сигналів на обох входах.

Функціонування регулятора ілюструє блок схема на рис. 1, яка складається з описаних нижче блоків. Блок установки стабілізованої напруги і корегування поточного значення кута управління (Б1 на рис. 1) утворюють: ДРЛ, в якому двійковим кодом записано поточне значення кута управління α ; генератор імпульсів Г1; логічні схеми «max» та «min» для обмеження діапазону регулювання кута α (сигнали з їхніх виходів забороняють імпульси з генератора на лічильні входи ДРЛ у разі досягнення в ньому чисел, відповідних границям діапазону регулювання).

Блок логічного керування (Б2 на рис.1) до якого належи тать логічні схеми «1» та «2» (знімають сигнал заборони з певного входу ДРЛ коли сигнал з компаратора К за межами зони нечутливості) і логічні схеми «3» та «4» (фіксують стан тригерів і формують сигнал для спрацювання «1» та «2»).

Блок формування зони нечутливості (Б3 на рис. 1) куди входять: двійковий лічильник ДЛ; генератор імпульсів Г2; логічні схеми «max» та «min» (визначають границі зони нечутливості); тригери Т1-Т4, зміна стану яких призводить до зміни двійкового коду ДРЛ, відповідного зміні кута управління $\Delta\alpha$.

Блок порівняння вихідної напруги інвертора $u_{вих}$ з опорною напругою (Б4 на рис.1), що має такий склад: аналого-цифровий перетворювач АЦП (перетворює змінну вихідну напругу $u_{вих}$ інвертора на пропорційну постійну напругу u_x і узгоджує її рівень з напругою розгортки u_p); генератор пилоподібної напруги розгортки ГПН; компаратор К (порівнює напруги u_x та u_p і видає сигнал у момент їхньої рівності). Крім того, регулятор містить логічну схему для порівняння сигналів (ПС), які надходять у ПС від лічильників ДРЛ і ДЛ. Сигнали, які з'являються на виході «а» лічильника ДРЛ у момент встановлення в ньому «0» і сигнали, які з'являються на виході «б» при збіганні чисел у схемі порівняння ПС, використовують для формування імпульсів управління.

Перебіг процесі у такому регуляторі проілюстровано на рис. 2. За початковий прийнято момент періодичного встановлення в ДЛ значення «0». У вказаний момент з входу «а» ДЛ знімається синхроімпульс (рис. 2,б), який приводить елементи блоку формування зони нечутливості у початковий стан: тригери Т1, Т3 – у стан «1» (синхроімпульс подано на входи S), (рис. 2, е, з); тригери Т2, Т4 – у стан «0» (синхроімпульс подано на входи R), (рис. 2, ж, і); на виходах логічних схем «3» та «4» встановлено «0» (сигнал заборони). Далі відбувається формування зони нечутливості. Імпульсна послідовність з генератора Г2, що поступає на вхід ДЛ, збільшує в ньому поточне значення числа до максимального значення, обмеженого кількістю розрядів лічильника. У момент, коли поточне число досягає значення С1 (відповідає уставці максимального рівня вихідної напруги) логічна схема «max» формує сигнал, що встановлює тригер Т2 у стан «1». У такий спосіб логічні схеми «min» та «max» на виході ЛС виділяють з числової послідовності у вигляді сигналів числа С1 та С2, які визначають границі зони нечутливості $Z=C1 \div C2$ (рис. 2, г, д).

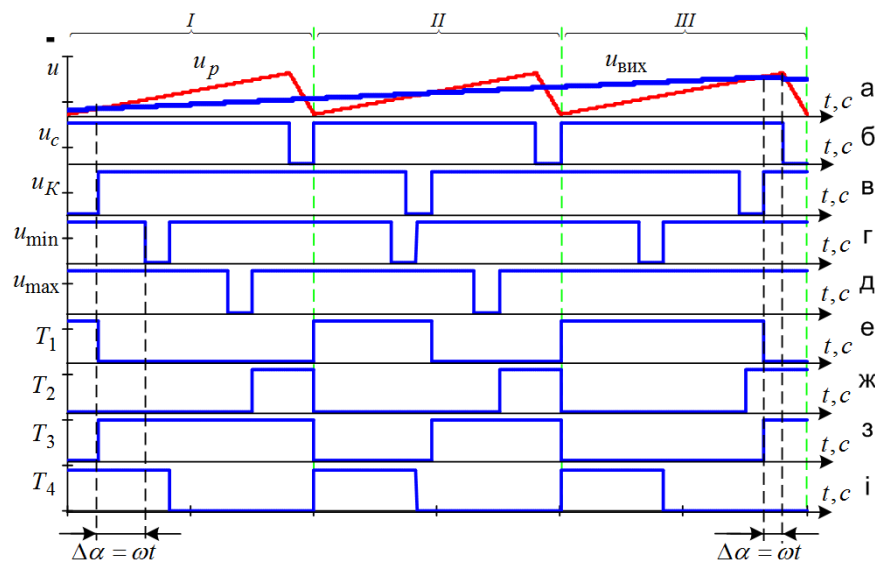


Рисунок 2 – Часові діаграми автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора

З моменті встановлення у ДЛ числа «0» генератор пилоподібної напруги починає формувати з нуля напругу розгортки, яка подається на компаратор К. У компараторі, куди одночасно поступають напруга

розгортки u_p і напруга u_x з виходу АЦП, у момент їх рівності формується установочний сигнал u_k (рис. 2, в), який надходить на вхід R тригера Т1 та вхід S тригера Т3. Відповідно стан тригера Т1 змінюється з «1» на «0», а стан Т3 навпаки – з «0» на «1». Таким чином, автоматичний регулятор спрацьовує, коли сигнал з компаратора надходить поза зоною нечутливості, яка обмежена сигналами з логічних схем «max» і «min».

Якщо вихідна напруга відповідає «нормі» і не потребує регулювання, то сигнал з компаратора попадає у часовий інтервал між сигналами з логічних схем «max'» та «min'», тобто у зону нечутливості. Оскільки у цій зоні немає збігу станів «1» тригерів Т1 і Т2 або Т2 і Т4, то логічні схеми «3», «4» зберігають сигнали заборони на обох входах ДРЛ; відповідно записаний у ньому кодовим числом кут керування транзисторів залишається незмінним. Функціонування автоматичного регулятора починається з моменту відхилення значень вихідної напруги від «норми». Якщо вихідна напруга нижче «норми» то сигнал з компаратора випереджає у часі сигнал зі схеми «min» і переводить тригер Т3 у стан «1», в якому перебуває тригер Т4. На збіг станів «1» тригерів Т3, Т4 реагує логічна схема «4» і видає сигнал на вхід логічної схеми «2», що знімає заборону з входу зворотного відліку ДРЛ. На даний вхід з генератора Г1 поступає імпульс на послідовність, яка зменшує записане у ДРЛ число (поточний кут керування вентилів) і тим самим збільшує вихідну напругу. Процес триває до появи сигналу з логічної схеми «min'», який переводить тригер Т4 у стан «0». У цей момент на виході логічної схеми «4» встановлюється «0» і відповідно виникає сигнал заборони на вході «-1» ДРЛ. Підвищення вихідної напруги до значення «норма» відбувається без участі тригерів Т1, Т2, які перебувають у стані «0». Черговий у часі імпульс, виданий схемою «max'» переводить тригер Т2 у стан «1». Якщо значення вихідної напруги перевищує норму, то сигнал компаратора з'являється пізніше у часі, ніж сигнал зі схеми «max'». Тоді у стані «1» одночасно опиняються тригер Т1 (під дією синхроімпульсу) і тригер Т2 (під дією сигналу схеми «max'»), що фіксує логічна схема «3» і видає сигнал, який знімає заборону з входу прямого відліку ДРЛ. Імпульси, які поступають з генератора Г1 на вхід «+1» ДРЛ, збільшують записане у ньому число (кут керування вентилів), внаслідок чого зменшується вихідна напруга. Процес припиняє сигнал компаратора, який переводить тригер Т1 у стан «0». З викладеного випливає наступне: у даному регуляторі-стабілізаторі напруги перетворення аналогової інформації (вихідної напруги) у цифрову полягає у тому, що часовий інтервал збігання «одиночних станів» тригерів Т1 і Т2 або тригерів Т3 і Т4 перетворюється у зміну двійкового коду ДРЛ, відповідного зміні кута керування вентилів.

Висновки

Розглянутий автоматичний регулятор-стабілізатор характеризується високою точністю стабілізації напруги, яка за відсутності аналогової ланки не залежить від вибору і ретельного налаштування прецизійних елементів, а визначається стабільністю ГПП і шириною зони нечутливості. Широка зона нечутливості у часі може бути обрана достатньо малою, оскільки за даної частоти f повністю визначається розрядністю n лічильників ДРЛ і ДЛ:

$$t_{3H} = \frac{|C_1 - C_2|}{2^{n+1} \cdot f}.$$

Регулювання напруги перетворювача здійснюється зміною установки рівня, пов'язаною зі зсувом зони нечутливості. Швидкість відпрацювання заданого кута регулювання залежить від частоти слідування імпульсів генератора Г1, яка обмежується тільки частотними властивостями інтегральних мікросхем.

На кафедрі теоретичної електротехніки [4] Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» був виготовлений експериментальний зразок описаного регулятора-стабілізатора і проведені лабораторні випробування його сумісної роботи з автономним інвертором напруги ($P=4$ кВт, $f=400$ Гц). Дослідження показали, що при розрядності лічильників $n=8$, рівності частот f_1 і f_2 генераторів Г1 і Г2, мінімальній ширині зони нечутливості

$t_{3H} = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_2}$ і зміні навантаження від номінального до неробочого ходу точність стабілізації вихідної

напруги інвертора складала 0.5%.

Список використаної літератури

1. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ, 2020, 300 с.
2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Київ, 2019, 248 с.
3. Колонтасвський Ю.П., Тугай Д.В. Перетворювальна техніка і нетрадиційні та відновлювальні електроенергетиці: навч. посібник. Харків, 2019, 67 с.
4. https://toe.fea.kpi.ua/laboratory_tasks_02.html

V. Grudska, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0002-7775-6397
V. Chybelis, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0003-2235-9826
V. Lobodzinskiy, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0003-1167-824X
National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

RESEARCH OF THE AUTOMATIC REGULATOR OF THE INPUT VOLTAGE STABILIZER OF AN AUTONOMOUS INVERTER

This article presents the results of the study of the automatic regulator of the stabilizer. In the work, the study of the output voltage of an autonomous inverter was carried out by introducing a digital form of setting the insert of a stabilized voltage and a digital form of comparison with a reference voltage. The achieved high accuracy of voltage stabilization does not depend on the choice and careful adjustment of the elements. This made it possible to achieve stability of the voltage generator and the width of the sensitivity zone. The voltage regulation of the converter is carried out by changing the level setting associated with the shift of the insensitivity. The speed of development of a given control angle depends on the pulse repetition rate of the generator, which is limited only by the frequency properties of integrated circuits. Improvement of the control system of the autonomous inverter made it possible to increase the accuracy of stabilization of the output voltage of the inverter, which made it possible to simplify the adjustment of the control system for easy coordination with other software elements. Studies have shown that the voltage regulation of the converter is carried out by changing the level setting associated with a shift in the dead zone. The speed of development of a given control angle depends on the pulse repetition rate of the generator, which is limited only by the frequency properties of integrated circuits. And with the equality of the frequencies of the pulse generators, the minimum width of the dead zone and the change in the load from nominal to no-load, the stabilization accuracy of the output voltage of the inverter was 0.5%.

Keywords: autonomous inverter, stabilization, output voltage, automatic control, phase-pulse control

REFERENCES

1. V.I.Senko, K.V.Trubitsyn, and V.I.Chybelis, "Inverters and frequency converters: monograph," *Kiev*, pp. 300. 2020.
2. M.Ia.Ostroverkhov, V.I.Senko, and V.I.Chybelis, "Impulse converters stabilizing voltage," *Kiev*, pp. 248. 2019.
3. Yu.P.Kolontaievskiy, D.V.Tuhai, "Conversion technology in unconventional and innovative energy," *Kharkov*, pp. 67. 2019.
4. https://toe.fea.kpi.ua/laboratory_tasks_02.html

Надійшла 17.12.2020
Received 17.12.2020

О. М. Терех, к.т.н., с. н. с., ORCID 0000-0002-1320-8594
В. А. Рогачов, к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-5489-874X
О. В. Баранюк, к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-6008-6465
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Ю. В. Жукова, к.ф.-м.н., пр.н.с., ORCID 0000-0003-11219-6373
Державна наукова установа «Інститут тепло і
масообміну ім. А.В. Ликова НАН Білорусі», Мінськ, Білорусь
О. І. Руденко, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8541-9710
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ТЕПЛОАЕРОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ

У статті проведений порівняльний аналіз теплоаеродинамічної ефективності малогабаритних теплообмінних поверхонь (радіаторів) з різним типом орєбрєння, які працюють в умовах вимушеної конвекції. Розглянуті пластинчасто-ребристі, голчасто-штирьові, сітчасто-дротові та пластинчасто-розрізні поверхні. Зіставлені поверхні мають приблизно однакові габарити, ребра розміщені на плоскій основі розміром 70x70 мм, висота ребер складає 35 мм. Розсіювана теплова потужність та швидкість охолоджуючого потоку змінюються, відповідно, у межах (20 – 80) Вт та (1,5 – 10) м/с, а аеродинамічний опір складає (5– 75) Па. Досліджені поверхні з пластинчасто-розрізним орєбрєнням з кроком між ребрами 6,9; 5,0; 2,5 мм, товщиною ребра 1,4; 0,55 мм, глибиною розрізки від вершини ребра 14; 21; 28 мм і кутами повороту розрізаних ділянок ребер до набігаючого потоку 30° та 45°. В якості критеріїв ефективності вибрані: температура перегріву основи поверхні по відношенню до температури навколишнього середовища та комплексний параметр $\alpha_{np} \cdot \Psi$, що враховує геометричні та теплофізичні характеристики поверхонь. Порівняльний аналіз показав, що неповне розрізання пластинчатих ребер і поворот їх розрізаних частин на певний кут до охолоджуючого потоку призводить до підвищення теплоаеродинамічної ефективності. Найбільшою тепловою ефективністю серед пластинчасто-розрізних поверхонь відзначається поверхня з відносною глибиною розрізки $h_r/h = 0,6$, без повороту ділянок ребер ($\varphi = 0^\circ$), кроком між ребрами $s = 2,5$ мм і товщиною ребра $\delta = 0,55$ мм. Її ефективність на (20 – 35) % вище, ніж у гладко-ребристій поверхні з параметрами $h_r/h = 0$; $\varphi = 0$, $s = 2,5$ мм, $\delta = 0,55$ мм. Порівняно з пластинчасто-розрізними поверхнями, що мають інші параметри орєбрєння, її ефективність в середньому вище на (50 – 65) %. Голчасто - штирьова поверхня за ефективністю знаходиться трохи вище за пластинчасто-ребристі з $s = 6,9$ мм, $\delta = 1,4$ мм та $s = 5,0$ мм, $\delta = 0,55$ мм, проте, нижче на (15 – 25)% пластинчасто-розрізних поверхонь, які мають міжреберний крок 6,9 та 5,0 мм, товщину ребра 1,4 та 0,55 мм, кути повороту 30°, 45° і глибину розрізки 14; 21; 28мм. Найгірші результати за теплоаеродинамічною ефективністю показали сітчасто-дротові поверхні.

Ключові слова: тепловідвідна поверхня, теплоаеродинамічна ефективність, пластинчасто-розрізні ребра, сітчасто - дротові ребра, голчасто-штирьові ребра, перегрів поверхні, порівняльні залежності.

Вступ

Забезпечення оптимальних режимів охолодження елементів радіоелектронної апаратури (РЕА), персональних комп'ютерів (ПК) та інших теплонавантажених елементів електронного устаткування є актуальним завданням, з вирішенням якого пов'язана важлива проблема надійності їх функціонування [1]. Температурні умови роботи пристроїв електронної техніки визначаються в основному двома чинниками: станом середовища, яке оточує апаратуру або теплонавантажений елемент, і кількістю теплоти, яку розсіює цей елемент в навколишнє середовище. Перегрів такого елемента зазвичай призводить до погіршення робочих характеристик і зменшення часу нормальної його роботи. Щоб уникнути цього, необхідно в процесі експлуатації не допускати високих температур нагрівання, які знаходяться в межах (80 – 90) °С, оскільки, при їх перевищенні, інтенсивність відмов теплонавантажених елементів різко зростає.

© О.М. Терех, В. А. Рогачов, О. В. Баранюк, Ю. В. Жукова, О. І. Руденко, 2020

Для вирішення проблеми тепловідводу використовуються різноманітні пристрої і способи охолодження. Найпростішим і дешевим в експлуатації залишається повітряне охолодження, що відбувається-

ся в умовах природної і вимушеної конвекції. У роботах [1-3] показано, що в порівнянні з рідинним або випарним охолодженням, ефективність повітряного охолодження нижча. Тому, для її збільшення, на практиці широко застосовуються різні ребристі малогабаритні поверхні, так звані радіатори. При використанні такої тепловідвідної поверхні, як правило, прагнуть понизити температуру її основи, яка безпосередньо встановлюється і контактує з поверхнею теплонавантаженого елемента. Крім того, при незмінній температурі повітря, що охолоджує, прагнуть зменшити габарити і масу поверхні, тобто зробити її ефективною і компактною. В даний час в системах охолодження теплонавантажених елементів електронних пристроїв застосовуються такі ребрені поверхні, як пластинчасті, голчато-штирьові, петельно-дротові, які, при сучасному розвитку електронної техніки, не завжди відповідають вимогам ефективного відведення надлишкової теплоти, а також, технологічності і вартості конструкцій.

Одним з шляхів підвищення інтенсивності теплообміну поверхні є забезпечення на її ребрах відривних течій, зменшення товщини прилеглої шару і турбулізації охолоджуючого потоку. Режим обтікання з вказаними властивостями, наприклад, можна створити в міжреберних каналах поверхні за допомогою повного або часткового розрізання прямокутних ребер на короткі ділянки в напрямку перпендикулярному до основи поверхні [4-10]. Подібні методи інтенсифікації застосовуються в поверхнях з труб із спіралью-стрічковим розрізним ребренням [11-14], в плоских трубах з бічними розрізними ребрами [15], в поверхнях з розрізними ребрами, встановленими на плоскій основі [16].

Мета роботи:

– оцінити теплоаеродинамічну ефективність тепловідвідної поверхні з пластинчато-розрізним ребренням шляхом порівняння її з теплоаеродинамічними ефективностями тепловідвідних поверхонь з сітчасто-дротовим [17–21], пластинчастим і голчато-штирьовим ребреннями [22, 23].

Завдання дослідження

Провести порівняльний аналіз і визначити кращу конструкцію за отриманими даними тепловідвідних поверхонь: з пластинчато-розрізним, сітчасто-дротовим, пластинчато-гладким і голчато-штирьовим ребреннями при фіксованих значеннях швидкості обдування повітряним потоком W_n , температури омиваючого середовища t_c , розсіяного теплового потоку Q , температури основи $t_{осн}$ за наступними критеріями:

- перегрів основи поверхонь залежно від теплового потоку, що відводиться $\Delta t = f(Q)$;
- за графічними залежностями приведених коефіцієнтів теплообміну і коефіцієнтів ребрення від швидкості обдування $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(W_n)$;
- за залежностями приведених коефіцієнтів теплообміну і коефіцієнтів ребрення від аеродинамічного опору $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(\Delta P)$.

Конструкція і геометричні характеристики тепловідвідних поверхонь: з пластинчастим ребренням

На рисунках (1–3) наведено конструкції тепловідвідних поверхонь з пластинчато гладким і пластинчато розрізним ребреннями, які розроблені і виготовлені в НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Геометричні характеристики досліджуваних пластинчато-ребристих поверхонь представлені в табл.1. Діапазони зміни геометричних розмірів поверхонь прийняті, виходячи з існуючих рекомендацій та вимог до конструювання і використання в радіоелектронній промисловості тепловідвідних поверхонь [22, 23].

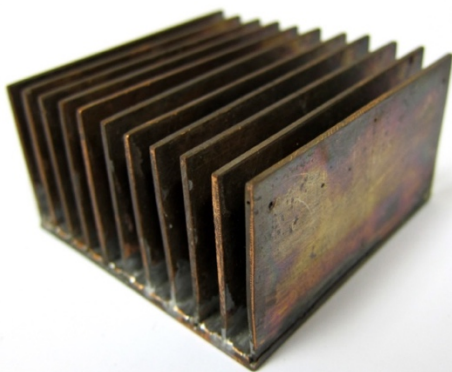


Рисунок 1 – Мідна тепловідвідна поверхня № 9 тип 1 (табл. 1) з пластинчастим гладким ребренням

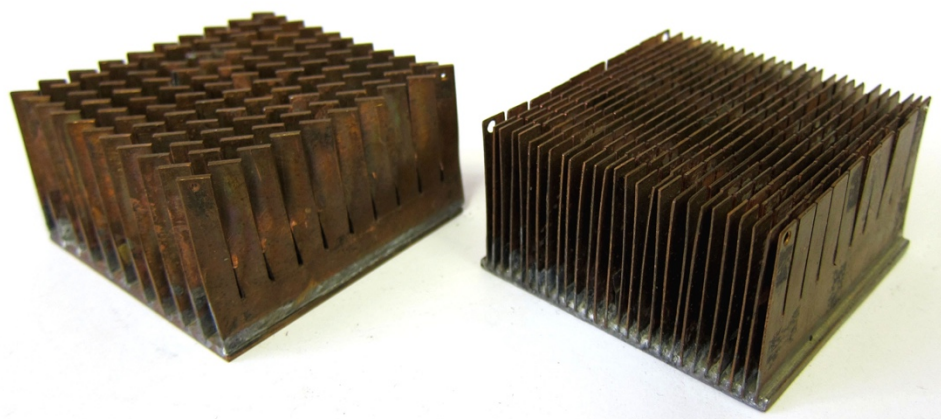


Рисунок 2 – Мідні тепловідвідні поверхні № 8 тип 1 (зліва), № 11 тип 2 (справа) з пластинчато-розрізним оребренням [4- 10]

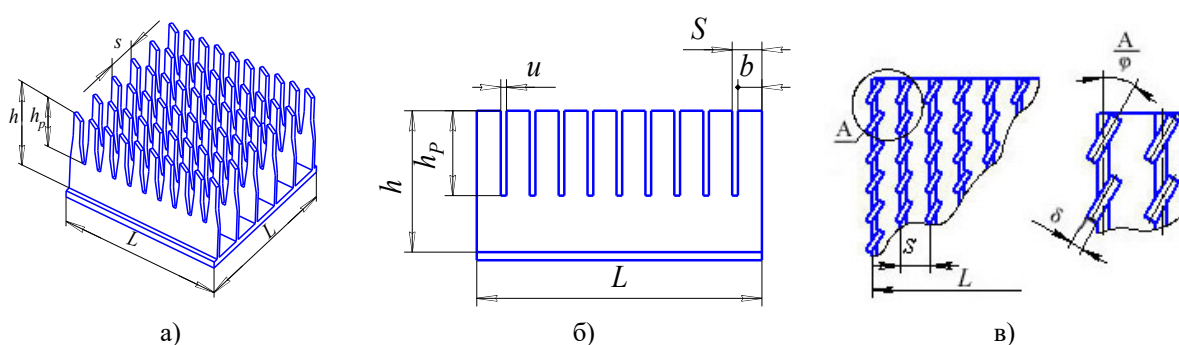


Рисунок 3 – Конструкція і геометрія тепловідвідної поверхні з пластинчато-розрізним оребренням:
а - загальний вигляд, б - вид збоку, в - вид зверху

Таблиця 1 – Геометричні характеристики пластинчато-розрізних поверхонь

Параметр	№ поверхні															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
h , мм	35,0															
s , мм	6,9								2,5				5,0			
δ , мм	1,4								0,55				0,55			
h_p , мм	14	21	28	14	21	28	21	28	0	14	21	0		21		0
S , мм	7,1								0	7,1	0		7,1		0	
b , мм	5,7								0	6,5	0		6,5		0	
Z , шт.	11								27				14			
F , см ²	603,3								1352,0				736,2			
φ , рад	0			$\pi/6$			$\pi/4$		0	0			0	$\pi/6$	$\pi/4$	0
Ψ	10,6								24,0				13,6			
тип	I								II				III			

Тепловідвідні поверхні з пластинчастими прямокутними ребрами, виготовлені з міді, мали плоску основу розміром $L \times L = 70 \times 70$ мм² товщиною $\delta_{\text{осн}} = 3$ мм, до якої припаяні гладкі пластинчасті ребра. Поверхні за геометричними характеристиками розділені умовно на три типи – тип 1, тип 2, тип 3 (див. табл.1), які відрізняються один від одного кроком між ребрами s , їх товщиною δ , кількістю ребер Z , повною площею зовнішньої поверхні F і коефіцієнтами оребрення Ψ .

Поверхні ребер кожного з типів в поперечному напрямі від вершини послідовно розрізались на глибину $h_p = 14; 21; 28$ мм (рис.2, 3), внаслідок чого на ребрі утворювалися розрізні ділянки однакової ширини b (табл.1). Проміжок між розрізними частинами ребер u вибирався так, щоб площа розрізних

ребер була не менше площі поверхні нерозрізаного ребра, тобто, дотримувалася геометрична умова $u \approx \delta$. Окрім цього, з метою турбулізації потоку, частини розрізаних ребер поверхонь №№4 - 6, №14 були повернуті до напрямку обдуваючого потоку на кут $\varphi = 30^\circ (\pi/6)$, а для поверхонь №№7, 8, 15 на кут $\varphi = 45^\circ (\pi/4)$ (табл.1).

Пластинчасті гладкі ребра поверхонь №№9, 12, 16 не мали розрізки ребер і використовувалися як базові (рис.1) для порівняння теплоаеродинамічних характеристик з поверхнями, у яких пластинчасті ребра мали тільки розрізку ребер ($h_p = \text{var}$; $\varphi = 0^\circ$), а також поверхні, що мали розрізку ребер ($h_p = \text{var}$) з поворотом ділянок на кути $\varphi = 30^\circ$ і $\varphi = 45^\circ$.

На рис. 4 і рис. 5 представлені відповідно конструкції тепловідвідних поверхонь з сітчасто-дротовим [17- 21] і голчасто-штирьовим оребреннями [23], які використовувалися у порівняльному аналізі теплоаеродинамічних характеристик поверхонь. Всі поверхні мали приблизно однакові габаритні розміри, що дозволило достатньо коректно проводити процедуру зіставлення їх теплоаеродинамічних ефективностей.

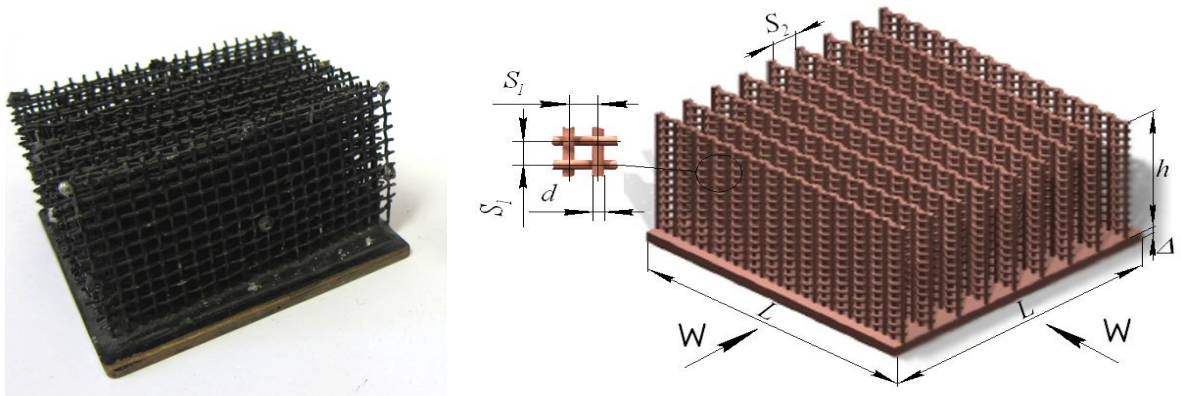


Рисунок 4 – Конструкція мідної тепловідвідної поверхні з сітчасто-дротовим оребренням [17-21].

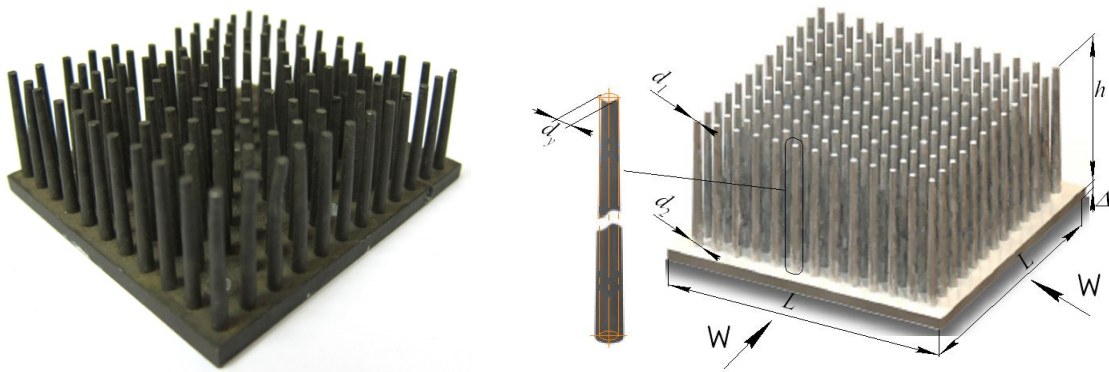


Рисунок 5 – Конструкція дюралюмінієвої тепловідвідної поверхні з голчасто-штирьовим оребренням [23]

Оцінка і порівняння теплоаеродинамічної ефективності тепловідвідних поверхонь з пластинчастим оребренням.

Одним з методів оцінки теплової ефективності розвинених поверхонь є обробка і представлення отриманих експериментальних даних у вигляді графічних залежностей $\Delta t = f(Q)$ при різних швидкостях обдування, де Q – розсіювана поверхнею тепла потужність, $\Delta t = t_{\text{очн}} - t_c$ – перегрів плоскої основи поверхні по відношенню до температури навколишнього середовища. На рис. 6 показано порівняння теплових характеристик мідних пластинчасто-ребристих поверхонь без розрізаних ребер ($h_p/h = 0$ $\varphi = 0$) з пластинчасто-ребристими поверхнями, що мають розрізані ребра на певну відносну глибину ($h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$) без поворотів розрізаних частин ребер ($\varphi = 0$) і розрізаних ребер з одночасним поворотом їх розрізаних частин на кути $\varphi = 30^\circ$ і $\varphi = 45^\circ$ (рис. 3). Зіставлення проводилося при фіксованій середній швидкості обдування $W_H = 3,5$ м/с в діапазоні теплових потужностей $Q = (20 - 80)$ Вт. Краща поверхня

вибиралася за результатами аналізу кривих графіку $\Delta t = f(Q)$. Як видно, при однакових перегрівах основи Δt , ефективніше є та поверхня, у якій розсіювана теплова потужність Q найвища, а відповідна крива по відношенню до інших кривих займає саме нижнє положення (рис.6).

Аналіз приведених даних показав, що при однакових температурах перегріву основи Δt , кількість теплоти, яку здатна розсіяти поверхня, в першу чергу визначається її конструкцією, величиною відносної глибини розрізання і кутом повороту розрізних частин пластинчастих ребер. Використання методу неповного розрізання і повороту розрізних частин ребер дозволяє відводити більше надлишкової теплоти в порівнянні з традиційним пластинчастим обрєбренням. Аналіз даних рис. 6 свідчить про те, що найбільшою тепловою ефективністю за критерієм перегріву основи, має поверхня типу II (№11) з $h_p/h = 0,6$ $\varphi = 0^\circ$, $s = 2,5$ мм і $\delta = 0,55$ мм. Наприклад, при $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ теплова ефективність цієї поверхні в середньому в 2 і в 1,25 рази вище, ніж відповідно, у поверхонь з пластинчасто-розрізним обрєбренням типів I і III, які мають різні товщину ребра, крок, глибину розрізання і кут повороту (табл.1).

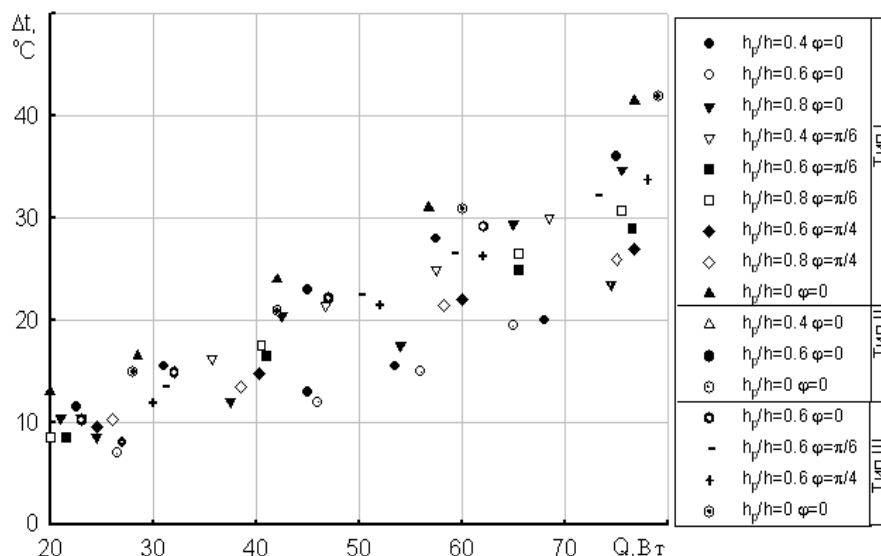


Рисунок 6 – Експериментальні залежності перегріву основи від надлишкової кількості теплоти поверхонь типів I – III

У дослідницькій практиці і інженерних методиках розрахунку радіаторів для умов вимушеної конвекції широко застосовується, так званий, приведений коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{пр}$, який одночасно враховує термічний опір теплопровідності, ефективність ребра і термічний опір конвективної тепловіддачі. Приведений коефіцієнт тепловіддачі визначається або з дослідних даних, або розраховується за залежностями [24, 25], а коефіцієнт ефективності гладкого прямокутного ребра знаходиться за відомими формулами [24 - 27]. При порівнянні ребристих теплообмінних поверхонь, що відрізняються одна від одної співвідношенням площ поверхні ребер і основи або коефіцієнтами обрєбрення Ψ , на практиці, часто використовується узагальнюючий параметр $(\alpha_{пр} \cdot \Psi)$. За інших рівних умов, цей параметр буде найвищим у найбільш ефективної поверхні.

На рис. 7 нанесені дослідні дані у вигляді залежностей $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(W_n)$ для радіаторів з пластинчастими ребрами, які приведені в публікаціях [4 - 10], а також дані, для сітчасто-дротових поверхонь при їх поздовжньому (лінія 1) і поперечному (лінія 2) омиванні повітряним потоком зі швидкістю набігаючого потоку W_n [17 - 21] та для голчасто-штирьових радіаторів [22, 23] (лінія 3).

Аналіз даних рис. 7 свідчить про те, що із збільшенням швидкості обдування поверхонь, параметр $\alpha_{пр} \cdot \Psi$ монотонно зростає. Чим ефективніше працює поверхня (більш інтенсивніше відбувається тепловідвід від ребристої поверхні), тим вище розміщена крива $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(W_n)$. Серед досліджених поверхонь найбільшою тепловою ефективністю володіє поверхня з розрізним обрєбренням типу II (№11); $h_p/h = 0,6$, $\varphi = 0^\circ$ і $s = 2,5$ мм, $\delta = 0,55$ мм, а найменшою - поверхня типу I (№9) з гладкими пластинчастими ребрами з кроком $s = 6,9$ мм і товщиною ребра $\delta = 1,4$ мм. З рис. 7, також слідує, що в результаті розрізання ребер і повороту їх розрізаних частин на кути 30° і 45° (поверхні типів I і II), теплова ефективність в досліджену діапазоні швидкостей зберігається достатньо високою і перевищує в середньому ефективність пластинчасто - ребристих поверхонь №9, 16 у (1,15 - 1,45) рази.

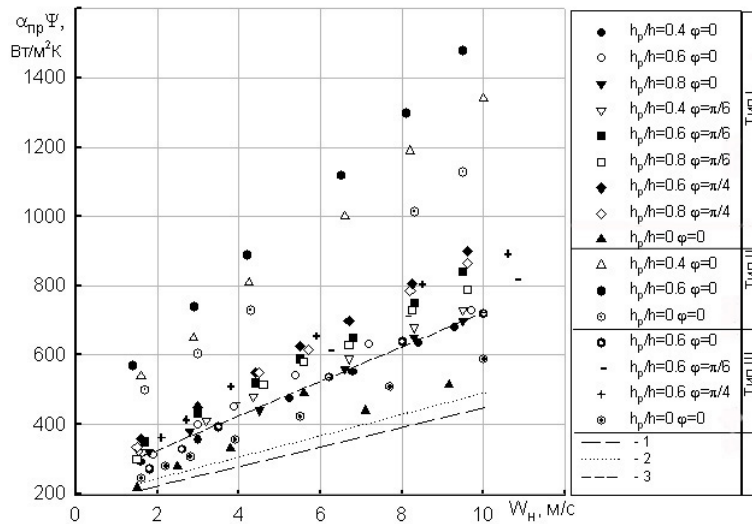


Рисунок 7 – Вплив швидкості набігаючого потоку на теплову ефективність поверхонь
 1, 2 – поверхні з сітчасто-дротовим оребренням, відповідно, при поздовжньому і поперечному їх обтіканні;
 3 – поверхня з голчасто-штирвовим оребренням.

Дані рис. 7 свідчать про те, що теплова ефективність сітчасто-дротових тепловідвідних поверхонь при поздовжньому і поперечному омиванні (лінії 1 і 2) в середньому на (50-80) % нижча, ніж для пластинчастих тепловідвідних поверхонь з розрізними ребрами і їх поворотом (типи I і III) за рівних умов швидкостей обдування і в (3,0-3,2) рази нижче, ніж для поверхонь №№10,11 типу II. Найгіршою серед порівнюваних, виявилася сітчасто-дротова поверхня при поздовжньому омиванні ребер (лінія 1). Поверхні з голчасто-штирвовим оребренням більш ефективніші і володіють ефективністю практично рівній ефективності тепловідвідних поверхонь типів I і III при низьких швидкостях обдування (1,5-3,5 м/с) і в середньому в (1,8-2) рази нижче, ніж у поверхонь типу II. У той же час, ефективність голчасто-штирвовой поверхні вище у (1,5 - 1,7) рази в порівнянні з сітчасто-дротовими.

Приведений на рис. 7 спосіб оцінки ефективності базується лише на теплових і геометричних характеристиках поверхонь, які оцінювалися по інтенсивності теплообміну за рахунок застосування різних форм оребрення і ступеню його розвиненості. Він не враховує втрати потужності на прокачування теплоносія через порівнювані поверхні. Для прийняття остаточного рішення по вибору найбільш ефективної поверхні дослідний і розрахунковий матеріал оброблявся у вигляді залежностей $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(\Delta P)$, які враховують одночасний вплив геометричних, теплових і аеродинамічних показників на ефективну роботу поверхонь (рис. 8).

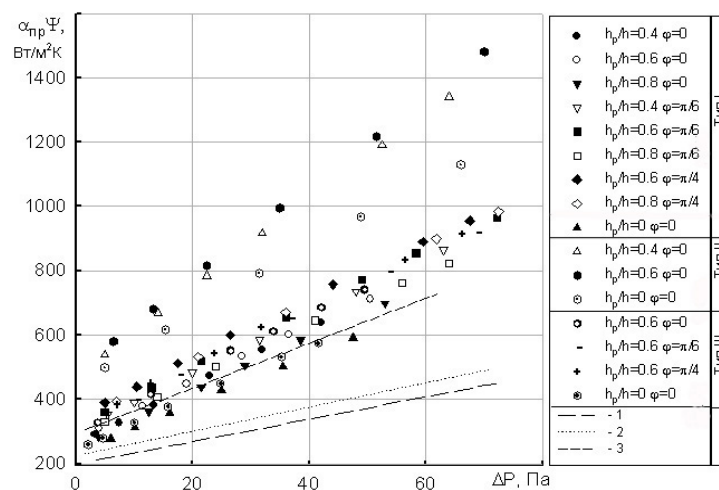


Рисунок 8 – Теплоаеродинамічна ефективність порівнюваних тепловідвідних поверхонь
 1, 2 – сітчасто-дротові поверхні при поздовжньому і поперечному їх омиванні відповідно; 3 – поверхня з голчасто-штирвовим оребренням.

Як видно з рис. 8, при однакових витратах потужності на подолання опору ΔP з усіх порівнюваних тепловідвідних поверхонь, найбільш ефективними є поверхні типу II (№№10, 11) з розрізним обрешеченням без повороту частин ребер ($\varphi = 0^\circ$) з „щільним” кроком між ребрами ($s = 2,5$ мм) і достатньо розвинутою площею теплообмінної поверхні ($F = 1350$ см²). Поверхні з пластинчастим нерозрізним обрешеченням типів I (№9), III (№16) і з розрізним обрешеченням типу I при $h_p/h = 0,8$ і $\varphi = 45^\circ$ ($\pi/4$) виявилися найгіршими.

З представлених на рис. 8 даних видно, що в дослідженому діапазоні аеродинамічних опорів найбільшу теплоаеродинамічну ефективність мають пластинчато-розрізні поверхні типу II (№11, 10), яка на (20 – 35) % вища, ніж у поверхні №12 без розрізання ребер ($h_p/h = 0$; $\varphi = 0$, $s = 2,5$ мм, $\delta = 0,55$ мм). В порівнянні з поверхнями типів I і III їх ефективність вище в середньому на (50 – 65)%. Голчато-штирвова поверхня по ефективності знаходиться декілька вище пластинчато - ребристих поверхонь №№ 9, 16, проте, нижче на (15 – 25) % пластинчато-розрізних поверхонь типів I і III. Гірші результати за теплоаеродинамічною ефективністю показали сітчасто-дротові поверхні (криві 1 і 2).

Висновки і рекомендації

За результатами порівняльного аналізу теплоаеродинамічної ефективності малогабаритних тепловідвідних обрешечених поверхонь з плоскою основою, призначених для вимушеного повітряного охолодження приладів електронної техніки в діапазонах розсіюваних теплових потужностей (20 - 80) Вт і швидкостей обдування (1,5 -10) м/с, слідує:

- неповне розрізання гладких пластинчастих ребер поверхонь призводить до збільшення теплоаеродинамічної ефективності;
- кращою теплоаеродинамічною ефективністю володіють тепловідвідні поверхні з пластинчато – розрізним обрешеченням і поворотом розрізних частин ребер на фіксований кут до омиваючого повітряного потоку;
- найбільше збільшення теплоаеродинамічної ефективності завжди спостерігається у пластинчато-ребристих поверхонь з відносною глибиною розрізання $h_p/h = 0,6$;
- ширина смуги розрізання не повинна перевищувати товщину ребра, що дозволяє зберігати максимальну тепловідвідну площу ребра.

Список використаної літератури

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: «Высшая школа», 1984 – 246 с.
2. Дульнев Г.Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Учебное пособие для студентов высших студенческих заведений. Л.: «Энергия», – 1971 – 248 с.
3. Чернышев А.А., Иванов В.И., Аксенов А.И., Глушкова Д.Н. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. М. Энергия, 1989 – 216 с.
4. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Рогачев В.А., Руденко А.И. Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25. №1. С. 10-16.
5. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Баранюк А.В., Цвященко Е.В. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным обрешечением при вынужденной конвекции. Промышленная теплотехника. 2005. Т.27. №4. С. 11-16.
6. Баранюк А.В., Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д. Аэродинамическое сопротивление пластинчатых поверхностей с разрезным обрешечением при вынужденной конвекции. Промышленная теплотехника. 2006. Т.28. №4. С. 29-33.
7. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Баранюк А.В., Бурлей В.Д. Теплоаэродинамическая эффективность новых теплоотводящих поверхностей с пластинчато-разрезным обрешечением. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2007. №1. С. 16-21.
8. Баранюк А.В. Интенсивность теплообмена продольно омываемых поверхностей с пластинчато-разрезным обрешечением. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 4/3 (28). С. 4-10.
9. Баранюк А.В., Рогачев В.А., Терех А.М., Руденко А.И. Численное моделирование конвективного теплообмена и аэродинамики поверхностей с пластинчато-разрезным обрешечением. Вісник НТУ „ХПІ”. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2017. № 9. С. 64-70.
10. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Rohachev V.A., Terekh A. M., Krukovskiy P.G. Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning. Thermal Science and Engineering Progress. 2019. V. 11. P. 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>.
11. Терех А.М., Шаповал О.Е., Письменный Е.Н. Среднеповерхностный теплообмен поперечно-омываемых коридорных пучков труб с разрезным спирально-ленточным обрешечением. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №1-2. С. 35-41.
12. Шаповал О.Е., Письменный Е.Н., Терех А.М. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых коридорных пучков труб с разрезным обрешечением. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №4-5. С. 63-68.
13. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Ральчук В.В. Аэродинамическое сопротивление в шахматных пучках труб со спирально-ленточным разрезным обрешечением. Промышленная теплотехника. 2007. Т.29. № 5. С. 30-35.

14. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Горащенко О.С. Теплообмен в шахматных пучках труб со спирально-ленточным разрезным оребрением. Промышленная теплотехника. 2007. Т.29. № 6. С. 15-22.
15. FENG LiLi, DU XiaoZe, YANG YongPing, YANG LiJun. Study heat transfer enhancement of discontinuous short wave finned flat tube. Science China. Technological Sciences. 2011. No 12. P. 3281-3288. doi.10.1007/s11431-011-4572-0.
16. Sakkarin Chingulpitak, Nares Chimres, Kitti Nilpueng, Somchai Wongwises. Experimental and numerical investigations of heat transfer and flow characteristics of cross-cut heat sinks. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. No 102. P. 142-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.098>.
17. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Разумовский В.Г. Теплообмен плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при вынужденной конвекции. Промышленная теплотехника. 2002. Т.24. №4. С. 71-78.
18. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Разумовский В.Г. Обобщение экспериментальных данных по конвективному теплообмену продольно омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2003. №1. С. 52-58.
19. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Руденко А.И. Расчет конвективного теплообмена поперечно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25. №4. С. 11-15.
20. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению поперечно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2004. №1. С. 28-31.
21. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Васильев А.Ф., Ежова В.В. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению продольно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2006. №1. С. 97-101.
22. ОСТ4.012.001 Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Методы расчетов. Редакция 1-77. – 68 с.
23. ОСТ4.ГО.012.003. Радиаторы игольчато-штыревые охлаждения полупроводниковых приборов. Методы расчета. Редакция 1-69.
24. Письменный Е. Н., Терех А.М., Семеняко А.В., Багрий П.И. Коэффициент эффективности прямоугольного ребра плоскоооальной трубы. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2010. № 2. С. 70-75.
25. Pis'mennyi E.N., Bagrii P.I., Terekh A.M., Semenyako A.V. Optimization of the finning of a new heat exchange surface of flat-oval tubes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V.86. N 5. P.1066-1071.
26. Краус А.Д. Охлаждение электронного оборудования. – Л.: Энергия, 1971. – 248 с.
27. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.

Список принятых позначень: b – ширина розрізаних частин ребер; F – площа тепловідвідної поверхні; h – висота ребра; h_p – висота розрізаної частини ребра; L – лінійний розмір основи; Q – відведений тепловий потік; q_m – питомий масовий показник; t – температура; S – крок між розрізними частинами ребер; s – крок між ребрами; u – ширина розрізки; W – швидкість повітряного потоку; Z – кількість ребер; α – коефіцієнт тепловіддачі; ΔP – аеродинамічний опір; Δt – перегрів; δ – товщина ребра чи основи; φ – кут повороту розрізної частини ребра; Ψ – коефіцієнт оребрення.

Індеси: н – налібаючий; осн – основа; пр – приведений; с – середина.

A. Terekh, Ph.D., senior Researcher, **ORCID** 0000-0002-1320-8594
V. Rogachov, Ph.D., associate professor, **ORCID** 0000-0001-5489-874X
A. Baranyuk, Ph.D., associate professor, **ORCID** 0000-0001-6008-6465
National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Yu. Zhukova, Ph.D., leading researcher, **ORCID** 0000-0003-11219-6373
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute
of the Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
A. Rudenko, Ph.D., associate professor, **ORCID** 0000-0002-8541-9710
National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

HEAT AERODYNAMIC EFFICIENCY OF HEATING SURFACES FOR COOLING OF ELECTRONIC DEVICE ELEMENTS

In the article a comparative analysis of the thermal aerodynamic efficiency of small-sized heat-exchange surfaces (radiators) with different types of fins under conditions of forced convection is carried out. In this article are described surfaces with plate finning, plate-split finning, needle-pin finning and mesh-wire. The compared surfaces have approximately the same overall dimensions, the fins are placed on a flat basis with a size of 70x70 mm, and the height of the fins is 35 mm. The dissipated thermal power and cooling flow velocity vary, respectively,

from 20 to 80 W and from 1,5 to 10 m/s, and the aerodynamic drag change from 5 to 75 Pa. Surfaces with plate and plate-cut fins with step between fins 6,9 mm; 5,0 mm; 2,5 mm, fin thickness 1,4 mm; 0,55mm, cutting depth of the fin 14 mm; 21 mm; 28mm and the angles of rotation of the sections of edges to the incoming stream 30° and 45° were investigated. The following performance criteria are used: surface overheating temperature relative to the ambient temperature and complex parameter $\alpha_{np} \cdot \Psi$, which takes into account the geometric and thermo physical characteristics of the surfaces. Comparative analysis showed that incomplete cutting of the plate fins and rotation of their parts at a certain angle to the cooling flow leads to an increase in thermodynamic efficiency. The highest thermal efficiency among the plate-cut surfaces is the surface with relative cutting depth $h_c/h = 0,6$, without rotation of the sections of edges ($\varphi = 0^\circ$), the step between the edges $s = 2,5$ mm and the thickness of the edges $\delta = 0,55$ mm. Its efficiency is (20 - 35) % higher than that of a smooth-finned surface with parameters $h_c/h = 0$; $\varphi = 0$, $s = 2,5$ mm, $\delta = 0,55$ mm. Compared to plate-cut surfaces having other finning parameters, their efficiency is on average higher by (50 - 65) %. The needle-surface surface is slightly higher than the plate-fined surface with $s = 6,9$ mm, $\delta = 1,4$ mm and $s = 5,0$ mm, $\delta = 0,55$ mm, however, lower by (15 - 25) % plate-cutting surfaces having an intercostal step of 6,9 mm and 5,0 mm, fin thicknesses of 1,4 mm and 0,55 mm, angles of rotation 30°, 45° and depth of cut 14 mm; 21 mm; 28 mm. The worst results in thermodynamic efficiency showed a mesh surface.

Keywords: heat sink surface, plate-split fins, wire-mesh fins, pin fins, surface overheating, thermodynamic efficiency, comparison.

REFERENCES

1. Dul'nev, H.N., Tarnovsky, N.N. (1971). Thermal conditions of in electronic equipment. Textbook for students of higher educational institutions. Leningrad, USSR, Energy Press, 248.
2. Dul'nev, H.N. (1984). Heat and mass transfer in electronic equipment. Moscow, USSR, High school Press, 246.
3. Chernyshev, A.A., Ivanov, V.I., Aksenov, A.I., Glushkova, D.N. (1989). Providing thermal conditions for electronic product. Moscow, USSR, Energy Press, 216.
4. Pismennyi, E.N., Burley, V.D., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Rudenko, A.I. (2003). Influence of cutting, bends and turn of the fins on the heat-aerodynamic parameters of the surfaces of heat transfer. Industrial Heat Engineering, Vol. 25, No 1, 10-16.
5. Pismennyi, E. N., Burley, V. D., Terekh, A. M., Baranyuk, A. V., Tsvyashenko, E. V. (2005). Heat transfer of flat-plating surfaces with cut fins at force convection. Industrial Heat Engineering, Vol. 27, No 4, 11-16.
6. Baranyuk, A.V., Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D. (2006). Aerodynamic drag of flat-plating surfaces with cut fins at force convection. Industrial Heat Engineering, Vol. 28, No 4, 29-33.
7. Baranyuk, A.V., Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D. (2007). Thermal-aerodynamic efficiency of new heat-removing surfaces with plate-split fins. Power Engineering: economics, technology, ecology, No. 1, 16-21.
8. Baranyuk, A.V. (2007). The heat exchange rate of longitudinally streamlined surfaces with plate-split fins. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, No 4/3 (28), 4-10.
9. Baranyuk, A. V., Rohachov, V.A., Terekh, A.M., Rudenko, A.I. (2017). Numerical simulation of convective heat transfer and drag of surfaces with plate-cut fins. Bulletin of NTU "KhPI". Power and heating engineering processes and equipment, No 9, 64-70.
10. Baranyuk, A.V., Nikolaenko, Yu.E., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Krukovskiy, P.G. (2019). Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning. Thermal Science and Engineering Progress, V. 11, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>.
11. Terekh, A. M., Shapoval, O. E., Pismennyi, E.N. (2001). Mid-surface heat transfer of transversely streamlined of in-lined tube bundles with cut spiral fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 23, No. 1-2, 35-41.
12. Shapoval, O. E., Pismennyi, E.N., Terekh, A. M. (2001). Aerodynamic drag of transversely streamlined of in-lined tube bundles with cut fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 23, No. 4-5, 63-68.
13. Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D., Ral'chuk, V.V. (2007). Aerodynamic drag in staggered tube bundles with cut spiral fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 29, No. 5, 30-35.
14. Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D., Gorashchenko, O.S. (2007). Heat transfer in staggered tube bundles with spiral cut fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 29, No. 6, 15-22.
15. FENG LiLi, DU XiaoZe, YANG YongPing, YANG LiJun. (2011). Study heat transfer enhancement of discontinuous short wave finned flat tube. Science China. Technological Sciences, No12, 3281-3288. [doi.10.1007/s11431-011-4572-0](https://doi.org/10.1007/s11431-011-4572-0).
16. Sakkarin Chingulpitak, Nares Chimres, Kitti Nilpueng, Somchai Wongwises. (2016). Experimental and numerical investigations of heat transfer and flow characteristics of cross-cut heat sinks // International Journal of Heat and Mass Transfer, No 102, 142-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.098>.

17. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Burley, V.D., Razumovskyi V. G. (2002). Heat transfer of flat surfaces with mesh-and-wire finning during forced convection. *Industrial Heat Engineering*, Vol. 24, No. 4, 71-78.
18. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Burley, V.D., Razumovskyi V. G. (2003). Generalization of experimental data of convective heat transfer of longitudinally streamlined flat surfaces with mesh-and-wire finning *Power Engineering: economics, technology, ecology*, No. 1, 52-58.
19. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Rudenko, A.I. (2003). Calculation of heat transfer of transversely streamlined flat surfaces with mesh-and-wire finning. *Industrial Heat Engineering*, Vol. 25, No. 4, 11-15.
20. Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D. (2004). Generalization of experimental data of aerodynamic drag of cross-flow flat surfaces with mesh-and-wire finning. *Power engineering: economics, technique, ecology*, No 1, 28-31.
21. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Burlei, V.D., Vasil'ev, A.F., Ezhova, V. V. (2006). Generalization of experimental data of aerodynamic drag of in-line-flow flat surfaces with mesh-and-wire finning. *Power engineering: economics, technique, ecology*, No 1, 97-101.
22. Industry standard 4.012.001. Radiators for cooling semiconductor devices. Calculation methods. USSR. Revision 1-77, 68.
23. Industry standard 4.GO.012.003. Radiators and pin-often cooling semiconductor devices. Calculation method. USSR. Editors 1-69.
24. Pismennyi, E. N., Terekh, A. M., Semenyako, A.V., Bagrii, P.I. (2010). Efficiency factor of rectangular fin of flat-oval tube. *Power engineering: economics, technique, ecology*, No 2, 70-75.
25. Pis'mennyi, E.N., Bagrii, P.I., Terekh, A.M., Semenyako, A.V. (2013). Optimization of the finbing of a new heat exchange surface of flat-oval tubes // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, V.86, No 5, 1066-1071.
26. Kraus, A. D. (1971). *Cooling Elctronic Equipment*. Leningrad, USSR: Energy, 248..
27. Kern, D. Q., Kraus, A. D. (1977). *Extended Surface Heat Transfer*. Moscow, USSR: Energy, 464.

Надійшла 27.12.2020

Received 27.12.2020

В.П. Калінчик, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185

В.В. Калінчик, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3931-646X

В.А. Побігайло, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329

Д.О. Мельник, магістрант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ВПЛИВАЮЧИХ ШКІДЛИВИХ І НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ

В статті проведений аналіз виробничої системи та сформований склад впливаючих шкідливих та небезпечних факторів. В якості об'єкта дослідження аналізуються підприємства з вироблення скла і скляних виробів. Представлена технологія вироблення скла і скляних виробів. Показано, що технологія отримання скла складається з двох виробничих циклів: циклу технології приготування скломаси і циклу технології отримання скляних виробів. Скловаріння проводиться в трьох стадіях: перша стадія – варіння у скловарних печах, коли відбувається хімічна взаємодія та освітлювання в'язкої маси, друга стадія – освітлення, відбувається видалення бульбашок, а також розчинення нерозчинених зерен піску. Третя стадія – охолодження скломаси до температури найбільш зручної для виготовлення виробів. У такій технології можна виділити характерні виробничі процеси, які характеризуються наявністю небезпечних та шкідливих для людини факторів. Транспортування сировини характеризується впливом шуму, впливом на дихальні шляхи аерозолів, впливом ергономічних факторів, виробничим травматизмом. Випалювання і плавлення характеризуються впливом продуктів згоряння, впливом димів і аерозолів вихідної сировини, пожежами або вибухами, впливом інфрачервоного випромінювання розплавленого матеріалу, електротравматизмом, впливом шумів. Ручні операції в процесі виробництва, переробки, фасувально-пакувальних робіт і зберігання на складі, відновлювальні роботи та реконструкція характеризуються різного роду травматизмом. Наведені чинники складають факторне поле небезпечних для людини впливів, яке містить чотири групи факторів: механічні – шум, ергономічні фактори виробництва, виробничий травматизм; температурні – теплове випромінювання, вплив продуктів згоряння, пожежі та вибухи, теплові удари та опіки; вплив аерозолів на дихальні шляхи людини, вплив допоміжних хімічних речовин; електричні – електротравматизм, вплив електромагнітних полів, а також вплив мікроклімату виробничих приміщень, який визначається діючими на організм людини поєднаннями температури, вологості і швидкості руху повітря, температури навколишніх його поверхонь. Показано, що рівень впливу небезпечних та шкідливих факторів експертно може бути встановлений, використовуючи відомий метод рангової кореляції. Одержані результати можуть бути використані для попереднього експертного оцінювання впливу небезпечних та шкідливих факторів на персонал підприємства з вироблення скла і скляних виробів.

Ключові слова. Охорона праці, моніторинг, виробнича система, скло, скляні вироби, експертне оцінювання.

Вступ. Сучасні методи оцінки рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів включають в арсенал своїх процедур та інструментів такий їх набір: процедуру ідентифікації ризиків; методологію оцінки ризиків, що спирається на визначення рівнів шкідливого впливу факторів ризику і ступеня їх впливу на організм людини.

Методологія оцінки ризиків спрямована на встановлення залежності «шкідливий вплив - результат», що виражається в кінцевому підсумку у визначенні шкідливого впливу на працівників певних професійних груп.

Метою роботи є аналіз виробничої системи та формування складу впливаючих шкідливих та небезпечних факторів.

Викладення основного матеріалу. Для формування складу впливаючих шкідливих та небезпечних факторів в першу чергу необхідно провести аналіз виробничої системи. В даній роботі в якості об'єкта дослідження аналізуються підприємства з вироблення скла і скляних виробів (рис. 1).

В основі сучасної технології виготовлення скла лежить метод Флоат, оскільки він має деякі переваги: висока продуктивність, утворення зовсім незначних оптичних дефектів скляної продукції, а отже, не виникає необхідність проведення додаткової обробки скла [1– 6].

© В.П. Калінчик, В.В. Калінчик, В.А. Побігайло, Д.О. Мельник, 2020

Вихідними матеріалами для виготовлення скла є білий кварцовий пісок SiO₂, сода Na₂CO₃, вапняк або крейда CaCO₃.

Допоміжними матеріалами є: барвники – додають певного кольору (оксиди свинцю, міді, бору); глушники – розподіляються в склі у вигляді дрібних частинок, розсіюють світло і утворюють скло молочно-білого кольору (фосфорнокислі, фтористі солі); знебарвлювачі – усувають фарбування скла від оксидів заліза (оксид нікелю, селен, сполуки марганцю); освітлювачі – видаляють газові включення (бульбашки) із розплаву (триоксид миш'яку, селітра); прискорювачі – прискорюють процес варіння скла (сполуки фтору, бору, хлору).

Технологія отримання скла складається з двох виробничих циклів [4-6].

Цикл технології підготовки скломаси включає операції:

– підготовки сирих матеріалів;
– змішування їх у певних співвідношеннях відповідно із заданим хімічним складом скла в однорідну шихту;

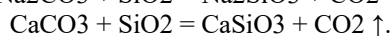
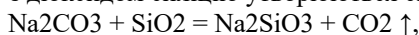
– варіння шихти в скловарних печах для отримання однорідної скломаси.

Цикл технології отримання скляних виробів складається з операцій:

– доведення скломаси до потрібної температури (і в'язкості);
– формування виробів;
– поступового охолодження виробів з метою ліквідації виникаючих у процесі формування напруг;
– термічної, механічної або хімічної (окремо або у взаємному поєднанні) обробки відформованих виробів для додання їм заданих властивостей.

Скловаріння проводиться при температурах 1400–1600°C. У ньому розрізняють три стадії.

Перша стадія – варіння, коли відбувається хімічна взаємодія та освітлювання в'язкої маси. Варіння скла здійснюється у скловарних печах. Вибір типу печі обумовлюється видом використаного палива, асортиментом виробів, розмірами виробництва тощо. Управління сучасною скловарною піччю суворо контролюється і в значній мірі автоматизоване. Контроль доведений до високого ступеня точності. Автоматично регулюються: тиск, співвідношення газоподібного або рідкого палива і повітря; кількість поданого в піч палива; рівень скломаси у ванні та інші параметри. Суміш цих речовин у відповідних співвідношеннях (скляну шихту) сплавляють у спеціальних печах. Спочатку при 700–800°C внаслідок взаємодії карбонатів натрію і кальцію з діоксидом силіцію утворюються силікати натрію і кальцію:



При 1200–1300°C силікати натрію і кальцію з надлишком діоксиду силіцію утворюють сплав



Друга стадія – освітлення, відбувається видалення бульбашок, а також розчинення залишків нерозчинених зерен піску; в цій стадії скло витримується в печі протягом декількох годин, при найбільш високій температурі. Скляну масу в розплавленому стані витримують до повного видалення газів та проводять знебарвлення додаванням незначних кількостей діоксиду марганцю MnO₂. Звичайне скло буває забарвлене в зелений колір домішками оксидів заліза, які потрапляють разом з піском. Діоксид марганцю надає склу рожевого забарвлення, а зелений і рожевий кольори в сукупності дають білий колір.

Третя стадія – охолодження скломаси до температури найбільш зручної для виготовлення з неї тих чи інших виробів.

В такій технології можна виділити наступні характерні виробничі процеси, які характеризуються наявністю небезпечних та шкідливих для людини факторів [6–10].

1. Транспортування сировини:

– вплив шуму в діапазоні від 85 до 100 дБ. Основні джерела шуму – пневматичні вібратори, компресори, пускачі, приводні двигуни змішувачів, вентилятори і пилозбірники;

– вплив на дихальні шляхи аерозолів, що утворюються в процесі транспортування і перемішування гранульованої твердої сировини. Шкідливий вплив залежить від складу сировини, але дуже часто обумовлений використанням кремнезему, глини, окису алюмінію, вапна, лужного пилу, оксидів металів, важких металів і шкідливих речовин;

– вплив ергономічних факторів, пов'язаних з виконанням вручну вантажно-розвантажувальних операцій і підйомом мішків з сировиною, з роботою вібраторів, транспортних засобів і експлуатацією обладнання;

– виробничі травми – їх причиною можуть бути рухомі залізничні вагони або автомашини, заводський вантажний транспорт; травми можна отримати також при роботі на висоті, вході в замкнутий простір, роботі з електричним, пневматичним або механічним обладнанням; причинами поранень можуть бути, наприклад, захоплення обладнанням, обертові частини, приводні шестерні, вали, ремені і ролики.

2. Випалювання і плавлення:

- вплив продуктів згоряння, наприклад, окису вуглецю, окислів азоту та діоксиду сірки;
- вплив димів і аерозолів вихідної сировини (наприклад, оксиду кремнію, металів, лужного пилу) або побічних продуктів (наприклад, фтористого водню, кристобалиту, диму важких металів);
- пожежі або вибухи, зумовлені використанням палива для нагріву або палива для автотранспорту; існує потенційна небезпека виникнення пожежі або вибуху в ємностях для зберігання палива, розподільних трубопроводах або випарювачах, а також в часто використовуваних дублюючих або резервних паливних газових системах;
- вплив інфрачервоного випромінювання розплавленого матеріалу, що збільшує ризик появи теплової катаракти і опіків шкіри;
- випромінювання енергії і тепловий удар - температура навколишнього середовища поблизу печей для випалу може бути досить високою. При виконанні аварійних ремонтних або звичайних профілактичних робіт в зоні процесів плавлення існує небезпека теплового удару. При зіткненні з нагрітими поверхнями або розплавленим матеріалом можливі серйозні опіки;
- електротравматизм – прямий вплив високої напруги, необхідної для роботи нагрівачів опору, які використовуються як джерела додаткового нагрівання поряд з паливною системою, може бути причиною виробничої травми зі смертельним результатом, а також становить небезпеку, як джерело електромагнітних полів. Сильні магнітні або електричні поля можуть створювати перешкоди для роботи електротрокардіостимуляторів та інших медичних приладів;
- вплив шуму, рівень якого перевищує 85–90 дБ, від роботи повітродувок, завантажувальних бункерів і змішувачів, живильників і конвеєрів.

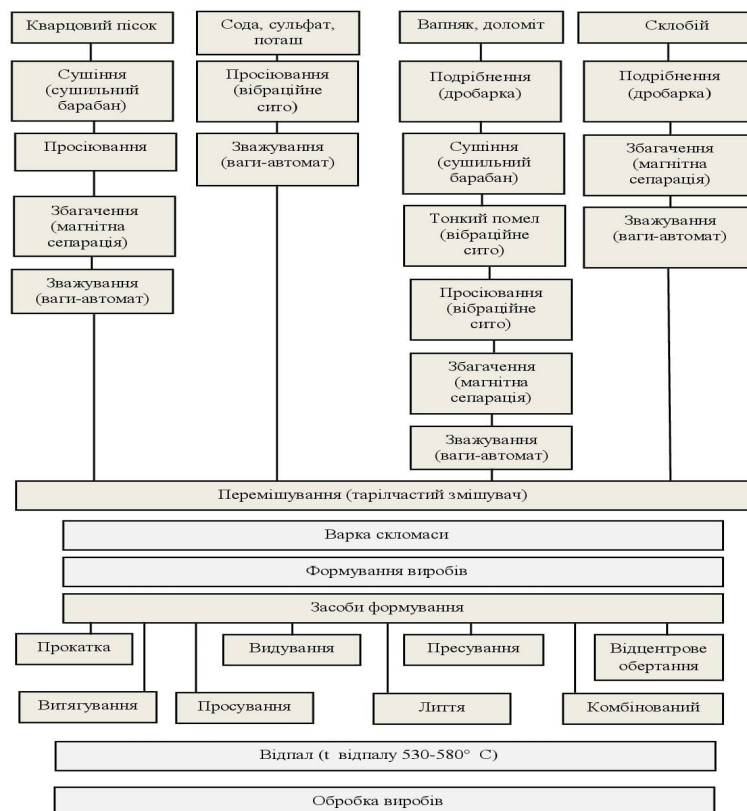


Рисунок 1– Технологія вироблення скла і скляних виробів

3. Ручні операції в процесі виробництва, переробки, фасувально-пакувальних робіт і зберігання на складі:

У аналізованій галузі промисловості умови ручної праці при виконанні робочих операцій з переробки сировини, розфасовці і упакувці в значній мірі відрізняються в залежності від розміру, форми і ваги виробів. Наявність сипучого матеріалу і матеріалів з високою щільністю обумовлює звичайні види травматизму, характерні для цих умов. Операції з підйому, вантажно-розвантажувальні операції в процесі виробництва, переробка та пакування, а також складські операції з використанням ручної праці призводять до різних видів травматизму із втратою працездатності.

Важливий фактор запобігання *ергономічному травматизму* є використання робототехніки, що замінює ручну працю при маніпуляціях з вантажами. Роботизовані засоби зменшують ергономічні навантаження і частоту появи рваних ран, походження яких пов'язане з виконанням ручних робіт (наприклад, при виробництві листового скла). Однак зростання частки роботів і автоматичної техніки підвищує небезпеку травматизму від рухомих частин обладнання та електрики, причому картина ускладнюється потенційним поєднанням різних видів травматизму і можливістю травмування працівників, що знаходяться поблизу (наприклад, поширення травматизму від робітників з виробничих ділянок на персонал, який виконує профілактичні роботи). Головний спосіб контролю за травматизмом робітників виробничих ділянок і персоналу, зайнятого виконанням профілактичних робіт, – це використання засобів електронного контролю відповідної конструкції, усталена логічна послідовність виконання операцій, огороження машин і обладнання, повне блокування електроживлення, забезпечення безпечних умов експлуатації та профілактики устаткування.

4. Відновлювальні роботи та реконструкція:

При виконанні відновлювальних або ремонтних робіт в холодних печах трапляються численні випадки травматизму. Будівельні роботи також характеризуються широким спектром потенційного травматизму. Великі ризики ергономічного плану при виконанні вручну операцій з вантажами, небезпечний вплив аерозолів оксиду кремнію, азбесту, волокон вогнетривкої кераміки або частинок, що містять домішки важких металів, на стадії розбирання або при роботі з відходами на стадії різання і зварювання. Ризики підвищує і вплив тепла, робота на висоті, можливість впасти, поскокнутися або потрапити в рухомі механізми, небезпека перебування в замкнутому просторі, небезпечний контакт з джерелами енергії.

Вищенаведені чинники складають факторне поле небезпечних для людини впливів [10], яке містить чотири групи факторів.

Механічні – шум, ергономічні фактори виробництва, виробничий травматизм. Найбільш небезпечним в цій групі факторів є виробничий шум, оскільки повністю уникнути його неможливо, і він може стати причиною виробничого травматизму. У робітників, які мають справу з гуркотливими машинами та механізмами, виникають стійкі порушення слуху, що нерідко призводить до професійних захворювань (глухуватості і глухоти). Найбільша втрата слуху спостерігається протягом перших десяти років роботи, і з плином часу ця небезпека зростає. Проте тривалий шум впливає не лише на слух. Він робить людину нервовою, погіршує її самопочуття, знижує працездатність та швидкість руху, сповільнює розумовий процес. Усе це може спричинити аварію на виробництві. Шум впливає на систему травлення і кровообігу, серцево-судинну систему. У разі постійного шумового фону до 70 дБ виникає порушення ендокринної та нервової систем, до 90 дБ – порушує слух, до 120 дБ – призводить до фізичного болю, який може бути нестерпним. Шум не лише погіршує самопочуття людини, а й знижує продуктивність праці на 10–15 %. У зв'язку з цим боротьба з ним має не лише санітарно-гігієнічне, а й велике техніко-економічне значення.

Температурні – теплове випромінювання, вплив продуктів згоряння, пожежі та вибухи, теплові удари та опіки. Головним параметром для цієї групи факторів є температура, або її перевищення над температурою, яка є нормальною для діяльності людини, оскільки людина постійно знаходиться в процесі теплової взаємодії з навколишнім середовищем. Для того, щоб фізіологічні процеси проходили нормально, тепло, яке виділяє організм, має виводитись в навколишнє середовище. Співвідношення між кількістю цього тепла і здатністю середовища до охолодження характеризує умови як комфортні. В умовах комфорту у людини не виникає турбот щодо температурних відчуттів охолодження чи перегріву. Висока температура впливає на людину і сприяє розширенню кровоносних судин. Відповідно має місце підвищений приплив крові до поверхні тіла, і тепловіддача в навколишнє середовище значно зростає. Однак, коли температура навколишнього середовища і поверхні досягає 30–35 °С, віддача тепла конвекцією і випромінюванням в основному припиняється. Більш висока температура повітря сприяє тому, що більша частина тепла віддається за рахунок випаровування його з поверхні шкіри. В таких умовах організм втрачає відповідну кількість вологи, а разом з нею і солі, які відіграють важливу роль в його життєдіяльності.

Під час впливу високої температури повітря, інтенсивного теплового випромінювання є можливість перегрівання організму людини, що характеризується підвищенням температури тіла, рясним потовиділенням, прискореним пульсом і диханням, різкою слабкістю, запамороченням, а в тяжких випадках – появою судом і виникненням теплового удару.

Вплив продуктів згоряння доцільно розглядати у поєднанні з їх хімічними властивостями в наступній групі факторів.

Вплив аерозолів на дихальні шляхи людини, вплив допоміжних хімічних речовин.

Шкідливий вплив факторів цієї групи визначається окремими маніпуляціями з сировиною, як і при здійсненні технологічних процесів.

При виконанні ремонтно-профілактичних робіт, у разі знесення, реконструкції та будівництва будівель.

Вплив в зонах відсутності вентиляції, в разі протікання і порушення герметичності на ділянках переміщення матеріалу, випускних жолобів, конвеєрів, елеваторів, грохотів і сит, змішувачів, установок для подрібнення і стирання, ємностей для зберігання, клапанів, трубопроводів, печей для сушки і затвердіння і т.ін .

Використання абразивних матеріалів, що викликають підвищене зношування систем транспортування і зберігання в процесі виробництва. Порушення умов утримання обладнання газоочищення, скрубєрів і пілозбірників, використання стисненого повітря для виконання операцій очищення збільшує ризик небезпечного впливу.

Шкідливий вплив факторів цієї групи визначається також хімічним складом речовини та її концентрацією. Найбільш розповсюдженими в цій групі є:

Вуглекислий газ CO_2 , що утворюється в результаті спалювання викопних видів палива, таких як вугілля, нафта, природний газ, штучне та синтетичне паливо і біомаса (деревина). У результаті неповного згорання виділяється також монооксид вуглецю CO – токсичний газ, що шкідливо впливає на серцево-судинну систему людини.

Діоксид сірки, або сірчистий ангідрид SO_2 – один із найтоксичніших газоподібних викидів енергоустановок – становить приблизно 90 % викидів сірчистих сполук із димовими газами котлоагрегатів (решта – SO_3). Найбільшу кількість сірки містять вугілля і важкі види нафтопродуктів; легкі нафтопродукти містять меншу кількість сірки і, нарешті, бензин і природний газ практично не мають її у своєму складі. Діоксид сірки впливає на окиснювання, руйнує матеріали, шкідливо впливає на здоров'я людини.

Оксиди азоту утворюються під час спалювання будь-якого з викопних видів палива, що містять азотні сполуки. Азот утворює із киснем ряд сполук (N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 і N_2O_5), властивості яких, активність і тривалість існування різні і слабо залежать від виду і складу палива. Концентрація оксидів азоту визначається режимом і організацією процесів горіння палива.

Токсичні продукти згорання становлять найбільшу загрозу для життя людини, особливо при пожежах в будівлях. Адже в сучасних виробничих, побутових та адміністративних приміщеннях знаходиться значна кількість синтетичних матеріалів, що є основними джерелами токсичних продуктів згорання. Так при горінні пінополіуретану та капрону утворюється ціанистий водень (синильна кислота), при горінні вініласту — хлористий водень та оксид вуглецю, при горінні лінолеуму — сірководень та сірчистий газ і т. ін. Найчастіше при пожежах відзначається високий вміст в повітрі оксиду вуглецю. Так, в підвалах, шахтах, тунелях, складах його вміст може становити від 0,15 до 1,5%, а в приміщеннях — 0,1—0,6%. Слід зазначити, що оксид вуглецю — це отруйний газ і вдихання повітря, в якому його вміст становить 0,4% — смертельне.

Можна зробити висновок, про взаємний зв'язок температурних та хімічних факторів, оскільки температура є однією з головних умов утворення шкідливих газів.

Електричні – електротравматизм, вплив електромагнітних полів. Дія електричного струму на людину має різносторонній характер.

Фактори, що діють на тяжкість ураження електричним струмом: сила, тривалість дії струму, його вид (постійний, змінний), шляхи проходження, також умови навколишнього середовища.

Електричний струм спричиняє термічну, електролітичну, біологічну та механічну дії.

Термічна дія проявляється у вигляді опіків тіла, нагріванні до високої температури органів, які знаходяться на шляху струму. При цьому виникають суттєві функціональні розлади.

Електролітична дія струму полягає в розшаруванні органічної рідини (крові, плазми), у зміні її фізико-хімічного складу.

Механічна дія струму – це розшарування, розриви тканин організму внаслідок електродинамічного ефекту і миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегрітої струмом тканинної рідини та крові.

Біологічна дія струму полягає в подразненні та збудженні живих тканин організму, а також супроводжується порушенням внутрішніх біоелектричних процесів.

Вплив електромагнітних полів (ЕМП) на організм людини залежить від щільності потоку енергії, частоти випромінювання, тривалості впливу, режиму опромінення, розмірів опромінюваної поверхні тіла, індивідуальних особливостей організму. В зоні впливу ЕМП людина зазнає теплового та біологічного впливу.

Аналізуючи наведене вище, приходимо до висновку, що різні небезпечні та шкідливі фактори мають різну тривалість дії, яка залежить від розглянутих виробничих процесів.

Окрім наведених вище небезпечних та шкідливих для людини факторів, які пов'язані безпосередньо з виробничим процесом, необхідно також розглядати вплив мікроклімату виробничих приміщень, який визначається діючими на організм людини поєднаннями температури, вологості і швидкості руху повітря, а також температури навколишніх його поверхонь.

Рівень впливу небезпечних та шкідливих факторів експертно може бути встановлений, використовуючи відомий метод рангової кореляції [11,12].

Обробка думок спеціалістів починається із складання анкети. Анкета складається із ряду факторів, які аналізуються і розташовуються по горизонталі: x_1, x_2, \dots, x_n . Спеціалістам, які добре знайомі із факторами впливу, пропонується присвоїти цим факторам номер тобто присвоїти ранги x_{ij} (x_{ij} – ранг j -го фактора, заданий i -им експертом). Після цього складається таблиця наступного виду.

Таблиця 1. Анкета для оцінювання рівня впливу факторів

Номер експерта	Фактори впливу			
	x_1	x_2	.....	x_n
1	x_{11}	x_{12}	.....	x_{1n}
2	x_{21}	x_{22}	.....	x_{2n}
.....			
m	x_{m1}	x_{m2}	.....	x_{mn}
$\sum_{i=1}^m x_{im}$	$\sum_{i=1}^m x_{i1}$	$\sum_{i=1}^m x_{i2}$	.....	$\sum_{i=1}^m x_{in}$

Середнє ранжованого ряду експерта визначається як $0,5(n+1)$, де n – кількість факторів. Загальне середнє для всієї таблиці рангів визначається:

$$a = \frac{1}{2} m(n+1), \tag{1}$$

де m – кількість експертів.

Квадрати відхилень сумарних рангів від загального середнього визначають

$$d_j^2 = \left(\sum_{i=1}^m x_{ij} - a \right)^2 \tag{2}$$

і сума квадратів відхилень

$$S(d_j^2) = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m x_{ij} - a \right)^2. \tag{3}$$

Доведено, що при повній узгодженості думок експертів, максимальна сума квадратів визначається як

$$S(d_j^2)_{\max} = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) \tag{4}$$

Надалі розраховується коефіцієнт конкордації

$$W_p = \frac{S(d_j^2)}{S(d_j^2)_{\max}}. \tag{5}$$

При повній узгодженості експертів $W_p = 1$, а при відсутності узгодженості $W_p = 0$.

Для визначення значимості коефіцієнта конкордації використовується наступна процедура. Доказано, що при $n > 7$ величина $m(n-1) W_p$ має χ^2 - розподіл з числом ступенів свободи $f = n-1$ (при $n < 7$ - використовуються таблиці Кендала)

$$\chi^2 = m(n-1)W_p. \tag{8}$$

Якщо розрахункове значення χ^2 розподілу виявиться більше ніж табличне

$$\chi^2 > \chi_m^2 (f = n-1, q = 0,05),$$

то думки спеціалістів вважаються узгодженими, і будується діаграма (гістограма) впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Метод експертних оцінок – це фактично метод прогнозування, критерієм якого є досягнення згоди серед усіх членів експертної групи.

Проведені експертні дослідження впливу небезпечних та шкідливих факторів на персонал підприємства з вироблення скла і скляних виробів.

Для восьми експертів підприємства були роздані анкети для визначення рівнів впливу на персонал наступних небезпечних та шкідливих факторів: x_1 - шум (включаючи ультразвук та інфразвук), x_2 - вібрація, x_3 - запиленість, x_4 - температура, x_5 - вологість, x_6 - освітленість, x_7 - електромагнітні випромінювання, x_8 - теплове випромінювання.

Результати опитування та розрахунку рангів зведені в табл. 2.

Таблиця 2– Результати ранжування

Номер експерта	Фактори впливу							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
1	8	4	7	5	3	6	2	1
2	7	3	8	6	4	5	1	2
3	8	2	7	5	4	6	3	1
4	7	3	8	6	4	5	2	1
5	8	4	7	6	3	5	1	2
6	7	3	8	6	4	5	2	1
7	8	4	7	5	3	6	1	2
8	8	3	7	6	4	5	2	1
Сума рангів	61	26	59	45	29	43	14	11
d_j^2	625	100	529	81	49	49	484	625

Нижче наведені результати розрахунків.

Загальне середнє для всієї таблиці рангів:

$$a = \frac{1}{2} m(n+1) = 36.$$

Сума квадратів відхилень:

$$S(d_j^2) = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m x_{ij} - a)^2 = 2542.$$

Максимальна сума квадратів:

$$S(d_j^2)_{\max} = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) = 2688.$$

Коефіцієнт конкордації

$$W_p = \frac{S(d_j^2)}{S(d_j^2)_{\max}} = 0,9457.$$

$$\chi^2 = m(n-1)W_p = 52,96.$$

Так як $\chi^2 = 52,96 > \chi_{кр}^2 = 14,1$ для ($f = n - 1, q = 0,05$), то думки спеціалістів вважаються узгодженими і результати ранжування представляються у вигляді гістограми (рис.2)

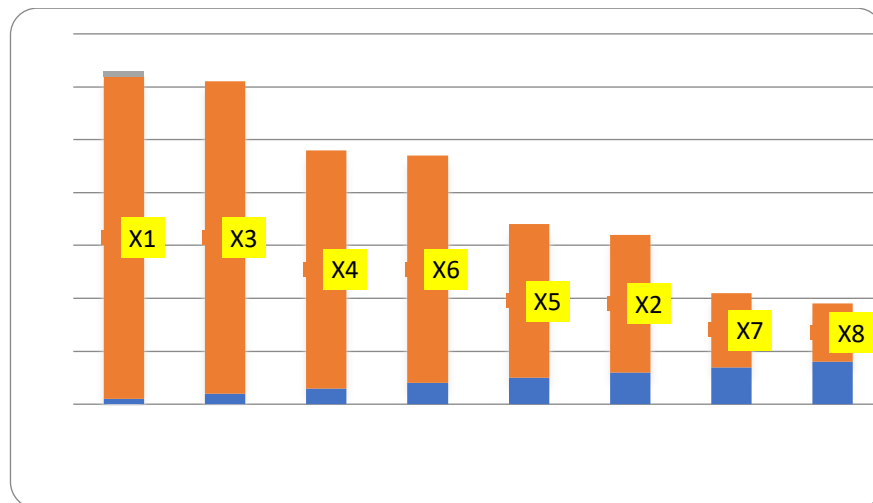


Рисунок 2. Гістограма ранжування впливу небезпечних та шкідливих факторів

Одержані таким способом результати можуть бути використані для попереднього експертного оцінювання впливу небезпечних та шкідливих факторів на персонал підприємства з вироблення скла і скляних виробів.

Висновок. Показано, що методологія оцінки ризиків спрямована на встановлення залежності «шкідливий вплив – результат», що виражається в кінцевому підсумку у визначенні шкідливого впливу на конкретних працівників певних професійних груп. У зв'язку з цим, для формування складу впливаючих небезпечних та шкідливих факторів, у першу чергу необхідно провести аналіз виробничої системи. Аналіз вибраного об'єкта дослідження – підприємства з вироблення скла і скляних виробів – показав, що технологія отримання скла складається з двох виробничих циклів, циклу технології приготування скломаси і циклу технології отримання скляних виробів, в кожному із яких наявні небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Показано, що в такій технології можна виділити характерні виробничі процеси, які характеризуються наявністю небезпечних та шкідливих для людини. Рівень впливу небезпечних та шкідливих факторів попередньо може бути оцінений експертами, використовуючи для цього метод рангової кореляції.

Список використаної літератури

1. Дудеров И.Г. Общая технология силикатов/ Дудеров И.Г., Матвеев Г.М., Суханова В.Б - М.: Стройиздат, 1987. – 559 с.
2. Бутт Ю.М. Общая технология силикатов/ Бутт Ю.М., Дудеров Г.Н., Матвеев М.А. - М.: Стройиздат, 1976. - 559 с.
3. Павлушкин Н.М. Практикум по технологии стекла и ситаллов/ Павлушкин Н.М., Сентюрин Г.Т., Ходаковская Р.Я. - М.: Издательство литературы по строительству, 1970. – 509 с.
4. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов/ Павлушкин Н.М. - Москва: Стройиздат, 1983. — 432 с.
5. Артамонова М.В. Химическая технология стекла и ситаллов/ Артамонова М.В. - Москва, МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1982. - 48 с.
6. Гулоян Ю.А. Технология стекла и стеклоизделий/ Гулоян Ю.А. -Владимир: Транзит-Икс, 2003, 480 с.
7. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла/ Шелби Дж.; [перевод с английского Е. Ф. Медведева]. - М.: Мир, 2006. - 288 с.
8. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство стекла. - М. Бюро НДТ. – 2015. – 89 с.
9. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда для стекольного производства. [Электронный ресурс].- 2007. – 22 с. – Режим доступа: <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect>.
10. Чернова А. С. Гигиеническая оценка условий труда и риска нарушений здоровья работающих в современном производстве стеклотары: дис..... канд. мед. наук: 14.00.17/ Чернова Анна Сергеевна. - Санкт –Петербург, 2007. – 142 с.
11. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии/ Бондарь А.Г., Статюха Г.А.,Потяженко И.А. – К.: Вища школа. – 1980. – 264 с.
12. Калінчик В. Експертне оцінювання впливу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища. *Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії* : матеріали XXXVII міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Переяслав-Хмельницький, 29-30 червня 2017 р. Переяслав-Хмельницький, 2017. С. 20–22.

V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000-0003-4028-0185

V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000-0003-3931-646X

V. Pobigaylo, Ph.D., ORCID 0000-0003-2673-7329

D. Melnyk, Master student

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

FORMATION OF THE COMPOSITION OF INFLUENTIAL HARMFUL AND DANGEROUS FACTORS OF THE PRODUCTION SYSTEM

The article analyzes the production system and the composition of the influencing harmful and dangerous factors. Glass and glass products are analyzed as the object of research. The technology of glass and glass products production is presented. It is shown that the technology of glass production consists of two production cycles: the cycle of glass technology and the cycle of glass products technology. Glassmaking is carried out in

three stages: the first stage - heating in glass furnaces, when there is a chemical interaction and clarification of the viscous mass, the second stage - lighting, the removal of bubbles, as well as dissolving the remaining undissolved grains of sand and the third stage - cooling glass to temperature convenient for making products from it. In such technology it is possible to allocate the following characteristic production processes which are characterized by existence of dangerous and harmful to the person factors. Transportation of raw materials is characterized by the influence of noise, the impact on the respiratory tract of aerosols, the influence of ergonomic factors, occupational injuries. Burning and melting is characterized by the influence of combustion products, the influence of smoke and aerosols of raw materials by fires or explosions, the influence of infrared radiation of molten material, electrocution, noise. Manual operations in the process of production, processing, packaging and storage in the warehouse and restoration work and reconstruction is characterized by various injuries. These factors make up the factor field of dangerous human influences, which contains four groups of factors: mechanical - noise, ergonomic factors of production, occupational injuries; temperature - thermal radiation, exposure to combustion products, fires and explosions, heat stroke and burns; the effect of aerosols on the human respiratory tract, the effect of auxiliary chemicals; electric - electrical injury, the influence of electromagnetic fields, as well as the influence of the microclimate of industrial premises, which is determined by the combinations of temperature, humidity and air velocity acting on the human body, the temperature of the surrounding surfaces. It is shown that the level of influence of dangerous and harmful factors can be expertly established using the known method of rank correlation. The obtained results can be used for preliminary expert assessment of the impact of hazardous and harmful factors on the personnel of the enterprise for the production of glass and glass products.

Keywords: labor safety, monitoring, production system, glass, glass products, expert evaluation.

REFERENCES

1. I.G. Duderov. General Technology of Silicates / I.G. Duderov, G.M. Matveev, V.B. Sukhanova - Stroiizdat, Moscow, 1987. – 559 p.
2. Y.M. Butt. General Technology of Silicates / Y.M. Butt, G.H. Duderov, M.A. Matveev - M.: Stroiizdat, Moscow, 1976. - 559 p.
3. N.M. Pavlushkin. A Handbook of Glass and Sitall Technology / N.M. Pavlushkin, G.G. Sentyurin, R.Y. Khodakovskya - Stroiizdat, Moscow, 1970. – 509 p.
4. N.M. Pavlushkin. Chemical technology of glass and glass ceramics / N.M. Pavlushkin - Stroiizdat, Moscow, 1983. — 432 p.
5. M.V. Artamonova. Chemical Technology of Glass and Sitals / M.V. Artamonova - Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 1982. - 48 p.
6. Y.A. Guloyan. Technology of Glass and Glass Articles / Y.A. Guloyan - Tranzit-IKS, Vladimir, 2003, 480 p.
7. J. Shelby. Structure, Properties, and Technology of Glass / J. Shelby - Mir, Moscow, 2006. - 288 p.
8. Best Available Technology Information Technology Handbook. Glass production. - Moscow: Bureau NDT. – 2015. – 89 p.
9. Environmental, Health and Safety Guidelines for Glass Manufacturing. [Electronic resource].-. 2007. – 22 p.
10. A. S. Chernova. Hygienic assessment of working conditions and the risk of workers' health violations in modern glassware production: M.D. thesis: 14.00.17/ A.S. Chernova. - Saint Petersburg, 2007. -142 p.
11. A.G. Bondar. Experiment planning in chemical technology / A.G. Bondar, G.A. Statyukha, I.A. Potyazhenko – Kyiv: Vysshaya Shkola, 1980. – 264 p.
12. V.V. Kalinchyk. Expert assessment of the impact of hazardous and harmful factors of the production environment. Problems and prospects for the development of science at the beginning of the third millennium in Europe and Asia: materials XXXVII international scientific-practical Internet conference, Pereyaslav-Khmelnysky, June 29-30 2017. p. 20–22.

Надійшла 28.12.2020

Received 28.12.2020

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 622.241

Н.І. Жукова, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4215-6981
А.І. Крючков, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-2234-0546
С.В. Зайченко, д-р техн. наук, проф, ORCID 0000-0002-8446-5408
В.Г. Смоляр, інженер ORCID 0000-0002-0355-0353
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ВІД ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

У статті розглянута проблема очищення стічних вод промислових підприємств, що містять іони важких металів. Оскільки при недостатньому очищенні стічних вод від іонів важких металів вони потрапляють у екологічні системи, накопичуються в них та спричиняють токсичний вплив на фіто та зооценоз навіть у незначних концентраціях, що в свою чергу призводить до порушення рівноваги екосистем та їх деградацію. Тому очищення промислових стоків з часом набуває все більшого значення. Розглянуто та проаналізовано застосування існуючих методів та сорбентів для очищення промислових стоків від іонів важких металів. Однак існуючі комбіновані методи очищення стоків та сорбенти по відношенню до важких металів мають незначну ефективність. В роботі пропонується застосування сорбентів на основі глини. Метою досліджень є обґрунтування доцільності застосування сорбентів на основі глини родовищ України для очищення стічних вод промислових підприємств від іонів важких металів. Глини вітчизняних родовищ не є дефіцитними, недорогі в порівнянні з існуючими сорбентами. Досліджувалися зразки сорбентів на основі глини, розроблявся та аналізувався їх склад. Розроблено методіку отримання сорбентів на основі глини. В якості активуючої добавки використовувалися такі матеріали, як торф, деревний попіл та доломіт. Досліджено склад та структуру розроблених сорбентів, а також їх сорбційну ємність і здатність до важких металів. Доведено, що ці сорбенти є ефективним матеріалом для очищення промислових стоків від іонів важких металів і можуть бути рекомендовані для використання.

Ключові слова: сорбент, глина, активоване вугілля, промислові стоки, важкі метали, сорбційна здатність.

Вступ

На сьогодні серед основних небезпечних забруднювачів довкілля все частіше розглядаються солі або іони важких металів. Ці сполуки спричиняють антропогенний вплив на екологічні системи і на саму людину. Це пов'язано зі збільшенням застосування важких металів, їх високою токсичністю, здатністю до накопичення в організмах живих істот та спричиняти на них шкідливий вплив навіть у незначних концентраціях. Забруднювачами довкілля є такі важкі метали: ртуть, свинець, кадмій, миш'як, мідь, ванадій, олово, цинк, сурма, молібден, кобальт, нікель тощо. Ці метали, на відміну від органічних забруднювачів, не руйнуються, а лише переходять із однієї форми існування в іншу.

Екологічний стан в Україні погіршується через комплексний вплив на організм людини радіонуклідів, важких металів, пестицидів та інших забруднювачів довкілля.

Основними джерелами надходження важких металів є гірничі підприємства, металургійні, паливно-енергетичні та хімічні комплекси, машинобудування, виробництво будівельних матеріалів, целюлозно-паперова та оборонна промисловість, полігони твердих побутових та промислових відходів, всі види транспорту. Токсична дія високих важких металів на живі істоти призводить до ураження або зміни діяльності центральної та периферичної нервової системи, органів кровотворення та внутрішньої секреції. Також важкі метали впливають на репродуктивну функцію людини та тварин, сприяють виникненню злоякісних новоутворень та порушень апарату спадковості.

При недостатньому очищенні стічних вод іони важких металів потрапляють у водойми та підземні горизонти, негативно впливаючи на живі істоти та рослини, накопичуючись в них. Тому очищення промислових стоків з часом набуває все більшого значення.

Слід зауважити, що запаси чистої води, як стратегічного ресурсу, обмежені. У зв'язку з цим набуває

особливого значення потреба в якісному очищенні промислових стоків і особливо від іонів важких металів.

Найчастіше на підприємствах застосовуються комбіновані методи очищення стічних вод. Концентрацію шкідливих речовин вони знижують в кілька разів відносно початкового (забрудненого) рівня. Однак, застосування цих методів не дозволяє знизити концентрацію забруднюючих речовин до гранично допустимих концентрацій (ГДК). Застосовані методи ефективно очищують стічні води при великих концентраціях шкідливих речовин, але коли концентрації низькі, ефективність очищення різко зменшується. Тому існує необхідність в доочищенні стічних вод [1].

Найбільш перспективним напрямком є застосування ресурсозберігаючих технологій, які дозволяють за мінімальних витрат ресурсів, найефективніше очищувати стічні води. Одним з таких напрямків є сорбційні методи, які широко застосовуються для глибокого очищення стоків промислових підприємств. Як сорбенти використовуються синтетичні речовини [2], активоване вугілля, а також деякі відходи виробництва, такі як шлак, тирса, зола тощо. Найбільш універсальним з сорбентів є активоване вугілля. Однак однією з основних проблем, що виникають при адсорбційному очищенні стічних вод активованим вугіллям, є його регенерація. Процес регенерації активованого вугілля протікає при високих температурах та тиску і є ресурсозвитратною процедурою, яка потребує значних коштів. Крім того, активоване вугілля ефективно очищує воду від органічних і нафтовмісних продуктів, однак його ефективність по відношенню до важких металів незначна [3, 4]. Глинисті матеріали та торф здатні сорбувати домішки органічного та неорганічного походження. Дані матеріали не є дефіцитними, недорогі в порівнянні з активованим вугіллям. Крім того їх можна модифікувати, тим самим збільшуючи їх сорбційну ємність.

Мета та завдання

Метою роботи є розроблення та аналіз сорбентів на основі глини вітчизняних родовищ для очищення стічних вод від іонів важких металів, які відрізнятимуться методикою модифікування хімічної структури.

Завданням статті є розроблення методики отримання нових сорбентів на основі глини для очищення води від іонів важких металів, а також дослідження структури розроблених сорбентів та визначення сорбційної ємності і здатності сорбційного матеріалу на модельних розчинах.

Матеріал і результати досліджень

Аналіз сучасного стану проблеми очищення стічних вод від іонів важких металів вказує на перспективність застосування природних мінералів, у тому числі і модифікованих, для використання в системах очищення промислових стоків.

У даній роботі як сорбенти пропонуються глини Пищиківського та Дибинецького родовищ Київської області. Як активуючі добавки використано такі матеріали, як торф, деревний попіл та доломіт. Для зміни хімічної структури суміші, морфології поверхні та утворення пористості використано термічну модифікацію.

Підготовка зразків сорбенту.

Вихідну глину попередньо подрібнювали спочатку в порцеляновій ступці, а потім в кульовому млині зі швидкістю обертання 3000 об/хв протягом 30 хвилин. Так само були підготовлені інші матеріали (торф, деревний попіл, доломіт). Після подрібнення торф піддавали піролітичному відпалу без доступу кисню при 600 °C протягом 15 хвилин.

Підготовлені компоненти змішували в певному складі, зазначеному в табл. 1. Для зв'язування використовувалась емульсія клею або дистильована вода. Отриману масу формували в кубічну форму з розміром ребра до 5 мм і просушувалась при температурі до 100 °C протягом 3 годин. Отримані зразки відпалювалися в муфельній печі при температурі близько 1000 °C протягом 3 годин.

Таблиця 1 – Вміст компонентів у сорбентах

Зразок	Вміст компонентів у зразках сорбентів						
	Глина 1	Глина 2	Подрібнений доломіт	Подрібнений торф	Деревний попіл	Дистильована вода	Зв'язуюча речовина
1	1	1	–	1	1	–	4
2	1	1	–	1	0,1	–	3
3	1	1	–	1	0,1	2	–
4	1	1	1	1	–	1,8	–
5	1	1	0,1	1	–	1,4	–

Продовження табл. 1

6	4	2	–	1	–	–	3
7	1	1	–	–	–	–	–
8	1	1	–	–	–	–	2

де глина 1 - глина Пищиківського родовища; глина 2 - глина Дибинецького родовища.

Для поліпшення характеристик вихідної глини її збагачували шляхом просіювання через сито з діаметром отворів 40 мкм.

Хімічний склад компонентів сорбенту наведено в табл. 2

Таблиця 2 – Хімічний склад компонентів сорбенту де С – концентрація речовин, %

Сполука	Зразок							
	Глина 1		Глина 2		Подрібнений доломіт		Деревний попіл	
	С, %	3σ, %	С, %	3σ, %	С, %	3σ, %	С, %	3σ, %
SiO ₂	67,8	5,6	58,9	4,9	33,0	3,62	33,1	3,72
CaO	13,72	0,34	0,49	0,062	69,1	0,87	36,9	0,65
Fe ₂ O ₃	8,16	0,059	1,61	0,016	5,82	0,059	5,83	0,058
K ₂ O	3,68	0,21	1,29	0,11	14,42	0,38	14,42	0,38
SO ₃	3,59	1,07	–	–	3,38	1,72	3,38	1,72
TiO ₂	1,28	0,05	1,32	0,038	1,62	0,07	1,62	0,07
Al ₂ O ₃	–	–	35,21	6,56	–	–	–	–
ZnO	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	2,4	0,077	2,4	0,077

З табл. 2 видно, що однакові хімічні складники мають різну концентрацію, а отже, змінюючи кількісне співвідношення глин в сорбенті, можна контролювати концентрацію таких компонентів, як оксиди кремнію, заліза, кальцію, алюмінію тощо. Доломіт складається з окидів кальцію і кремнію. Також у ньому наявні незначні кількості оксидів калію і цинку. Деревний попіл містить у своєму складі оксиди кремнію кальцію і калію.

В результаті термообробки зразків відбувається вигорання органічних компонентів. При цьому змінюється морфологія сорбенту, і він набуває пористої структури, з розвиненим рельєфом та наявністю макропор розміром близько 1 мкм для всіх зразків.

Щільність сорбентів визначалася методом гідростатичного зважування. Для цього гранулу сорбенту спочатку зважують на повітрі, а потім в воді. За різницею мас розраховувалася щільність матеріалу сорбенту. Результати вимірювань наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Щільність сорбентів, визначена методом гідростатичного зважування

Зразок сорбенту	Щільність зразка сорбенту, г/см ³
1	1,8
2	1,9
3	1,7
4	2,0
5	1,8
6	1,8
7	1,8
8	1,7

Сорбційна здатність перевірялась шляхом пропускання через наважку сорбенту модельного розчину. Вихідний модельний розчин сполук важких металів готували шляхом розчинення відповідних наважок солей: $Pb(NO_3)_2$, $ZnCl_2$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ у дистильованій воді, в концентраціях близьких до середніх після стадії біологічного очищення стоків: Cu – 2мг/л, Zn – 3 мг/л, Mn – 4 мг/л, Pb – 5 мг/л.

Як еталон було використане активоване вугілля марки БАУ-А виробництва України, яке застосовується для очищення стічних вод, водопідготовки та як наповнювач фільтрів доочищення питної води шляхом видалення розчинених органічних речовин та покращення її органолептичних властивостей [6].

В табл. 4 та на рис. 1 наведено концентрації іонів важких металів (у відсотках) у розчинах після їх оброблення зразками сорбентів.

Таблиця 4 – Концентрації іонів важких металів у розчинах, оброблених зразками сорбентів

Елемент	Номер зразка								Активоване вугілля марки БАУ-А (еталон)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
<i>Cu</i>	12,51	0,05	0,05	0,32	0,25	19,2	12,81	21,81	0,76
<i>Mn</i>	3,91	0,03	0,02	0,07	0,15	4,92	15,81	20,82	5,06
<i>Zn</i>	11	8,95	3,21	45,98	34,54	78,87	89,25	10,98	99,20
<i>Pb</i>	1,24	12,1	10,25	8,89	3,01	18,02	41,95	35,43	2,73

З даних табл. 4 видно, що 2–6 зразки сорбентів очищують метали з ефективністю близькою до еталонного, а стосовно елементів *Zn*, *Cu* та *Mn* ефективність очищення навіть вище еталонного.

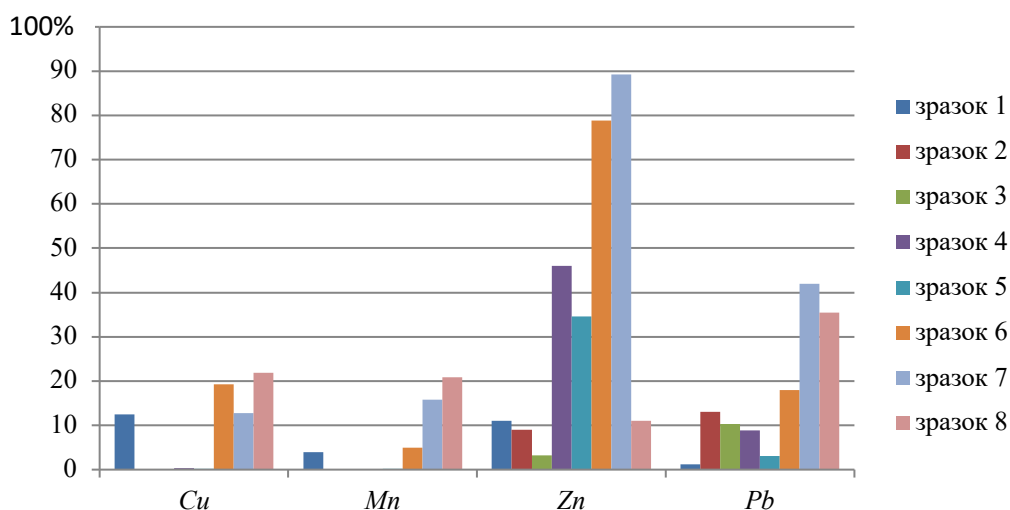


Рисунок 1 – Концентрації іонів важких металів в розчинах після оброблення сорбентами

Сорбційна ємність є важливою характеристикою сорбенту. Величина сорбції (мг/г) розраховується за формулою [5]:

$$A = \frac{(C_0 - C) V}{m},$$

де C_0 - вихідна концентрація катіонів металів, мг/л;

C - рівноважна концентрація важких металів після сорбції, мг/л;

V - об'єм розчину, л;

m - маса сухого сорбенту, г.

Як приклад, на рис. 2 наведено залежність величини сорбції свинцю від часу. З графіка видно, що процес сорбції з застосуванням зразків 1-5 досягає рівноваги протягом 10-20 хвилин.

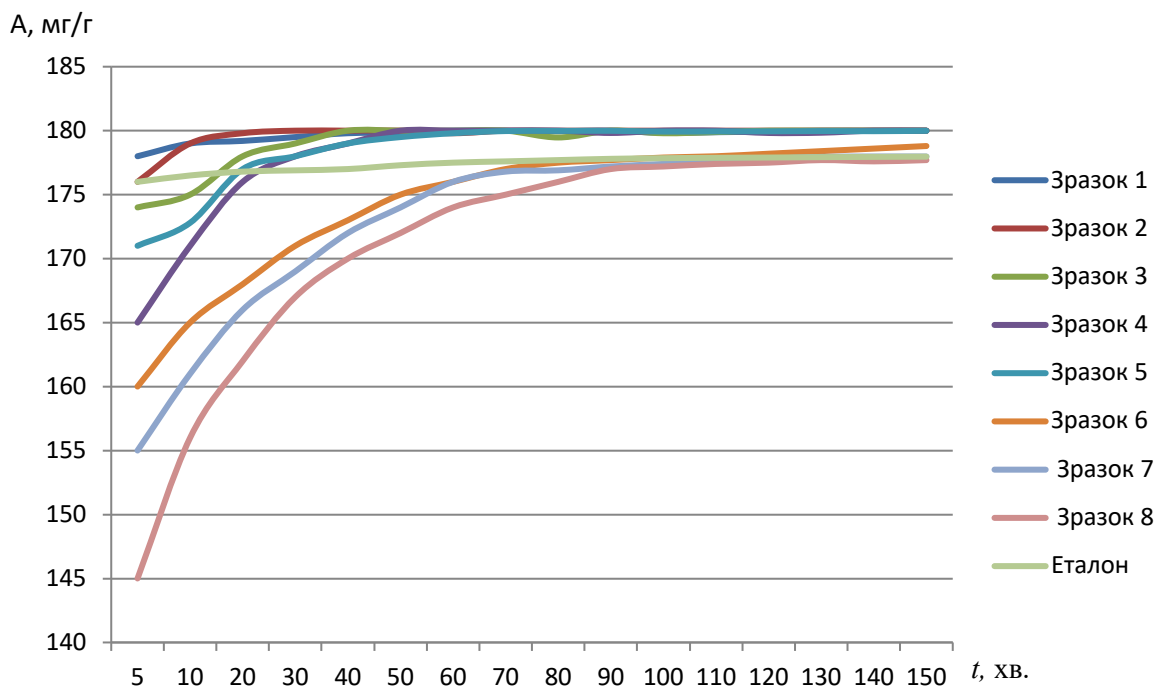


Рисунок 2 - Залежність величини процесу сорбції свинцю від часу

Висновки

1. Проведені дослідження показали, що сорбенти, розроблені на основі глин вітчизняних родовищ, можливо використовувати для якісного очищення стічних вод промислових підприємств від важких металів.

2. Запропоновані сорбенти при збереженні якості очищення води складаються з більш дешевої поширеної силікатної сировини (природних глинистих мінералів) у порівнянні з наявними аналогами, наприклад, на основі активованого вугілля.

3. Показано взаємозв'язок між складом досліджуваних сорбентів та їх кінетичними й ємнісними характеристиками у процесах видалення іонів важких металів.

4. Визначено, що запропоновані сорбенти на основі глин здатні сорбувати іони важких металів (*Zn*, *Cu*, *Mn*, *Pb*) з високою швидкістю. Рівновага в системі досягається протягом 10-20 хвилин.

5. Зразки № 2, 3, 4, 5 показали найкращу сорбційну здатність до іонів металів, тому саме їх можна рекомендувати для подальшого використання в промислових цілях, на стадії доочищення стічних вод від іонів важких металів.

Список використаної літератури

1. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: Монография. – Дн-вск.: Континент, 2008. 254 с.

2. Yahya HF, Ghada A, Mahmoudb MA, Abdel Khalek. Radiation crosslinked poly (vinyl alcohol)/acrylic acid copolymer for removal of heavy metal ions from aqueous solutions. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2014. Vol. 7, № 2. P. 135-145.

3. Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н. А., Астрелін І. М., Брик М. Т., Гвоздяк П. І., Князькова Т. В. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод. Підручник. – К.: Лібра, 2000.-552 с.

4. Долина Л. Ф. Сорбционные методы очистки производственных сточных вод: Учебное пособие. – Д.: ДИИТ. – 2000. – 84 с.

5. <https://snabhim.kharkov.ua/p502540153-aktivirovannyj-ugol-marki.html>

6. Самченко Ю., Коротич О., Керносенко Л., Полторацька Т., Літцис О., Пасмурцева Н., Легенчук О., Крикля С. Видалення важких металів з водних розчинів за допомогою гібридного гідрогелю на основі

N. Zhukova, Cand. Eng. Sc., ORCID 0000-0002-4215-6981

A. Kryuchkov, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-2234-0546

S. Zaichenko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408

V. Smoliar, Eng., ORCID 0000-0002-0355-0353

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

WASTEWATER TREATMENT FROM HEAVY METAL IONS

The article considers the problem of wastewater treatment of industrial enterprises containing heavy metal ions. Because of insufficient treatment of wastewater from heavy metal ions, they enter ecological systems, accumulate in them and cause toxic effects on phyto and zoocenosis, even in small concentrations, which in turn leads to imbalance of ecosystems and their degradation. Therefore, the treatment of industrial effluents is becoming increasingly important over time. The application of existing methods and sorbents for purification of industrial effluents from heavy metal ions is considered and analyzed. However, existing combined wastewater treatment methods and sorbents have little effectiveness against heavy metals. The paper proposes the use of clay-based sorbents. The purpose of research is to substantiate the feasibility of using sorbents based on clays of deposits in Ukraine for wastewater treatment of industrial enterprises from heavy metal ions. Clays of domestic deposits are not scarce, inexpensive in comparison with existing sorbents. Samples of sorbents based on clay were studied, their composition was developed and analyzed. A method for obtaining clay-based sorbents has been developed. Materials such as peat, wood ash and dolomite were used as activating additives. The composition and structure of the developed sorbents, as well as their sorption capacity and ability to heavy metals have been studied. These sorbents have been shown to be an effective material for cleaning industrial effluents from heavy metal ions and can be recommended for use.

Keywords: sorbent, clay, activated carbon, industrial effluents, heavy metals, sorption capacity.

REFERENCES

1. Dolina L.F. *Sovremenniaia tehnika i tehnologii dlia ochistki stochnix vod ot solei tiajolihi metalov: Monografia.* – Dn-vsk.: Kontinent, 2008. 254 p.
2. Yahya HF, Ghada A, Mahmoudb MA, Abdel Khalekc. Radiation crosslinked poly (vinyl alcohol)/acrylic acid copolymer for removal of heavy metal ions from aqueous solutions. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences.* 2014. Vol. 7, № 2. P. 135-145.
3. Zapolskii A. K., Mishkova-Klimenko N. A., Astrelin I. M., Brik M. T., Gvozdiak P. I., Kniazkova T. V. *Fiziko-himichni osnovy tehnologii jchichennia stichnih vod.* Pidruchnyk. – K.: Libra, 2000.-552 p.
4. Dolina L.F. *Sorbcionnye metody ochistki proizvodstvennih stochnih vod: Uchebnoe posobie.* – D.: DIIT. – 2000. – 84 p.
5. <https://snabhim.kharkov.ua/p502540153-aktivirovannyj-ugol-marki.html>
6. Samchenko U., Korotich O., Kernosenko L., Poltoracka T., Litcis O., Pasmurceva N., Legenchuk O., Krikliia S. *Vidalennia vajkih metaliv z vodnih rozchiniv za dopomogou gibridnogo godrogeliu na osnovi poliviniilformaliju ta poliakrilovoi kysloty.* *Journal Hromatografichnogo tovaristva – t. XVII. – K. 2017. P. 27-38.*

Надійшла 27.01.2020

Received 27.01.2020

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі **Microsoft Word (версії 2007 та вище)** і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегль 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) Структура статті:

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат **обсягом 1700-2000 знаків,**
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю не менше 300 dpi. Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи усіх осей на самому рисунку. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул Math Type (версія 6.8 і вище) або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9. Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки: (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається двічі: мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються 3 мовами (укр., англ. та рос.). Вказується повна назва організації або установи, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (ОБОВ'ЯЗКОВО);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: kravkpi@ukr.net