



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-7>

УДК 691.32



АРСІРІЙ В. А.

Доктор техн. наук, професор, професор кафедри, Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна, тел.: +38 (067) 559-89-85, e-mail: arsirij@odaba.edu.ua ORCID: 0000-0003-3617-8487



КРОШКА О. В.

Аспірант, Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна, тел.: +38 (096) 767-38-38, e-mail: Kolvi@epg.kolvi.com ORCID: 0000-0003-0975-3079

ТЕРМО- І АЕРОМОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ГАЗОТРУБНИХ КОТЛІВ

АНОТАЦІЯ

Забезпечення житлових комплексів електричною та тепловою енергією стає одним із пріоритетних завдань України. Руйнування інфраструктури житлових комплексів потребують оперативного відновлення енергетичних систем. Газотрубні котли є хорошим варіантом швидкої установки теплової генерації як житлового, так і промислового комплексів. Головна особливість таких котлів – організація динаміки термо- та аеропроектів у трубах з гарячими димовими газами. Численні дослідження вказують на проблеми із забезпеченням інтенсифікації теплообміну на кордоні газ – метал та аналізу результатів при зіставленні змін термо- та аеропроектів. Неоднозначності при аналізі енергетичних змін дають суперечливі рекомендації щодо розробки нових конструкцій котлів.

Метою роботи є підвищення потужності та покращення енергетичних показників газотрубних котлів за рахунок інтенсифікації теплообміну при передачі тепла на кордоні газ – метал із забезпеченням помірних змін опорів елементів газового тракту котлів. Потреба масового відновлення систем забезпечення житлових комплексів теплом робить актуальним питання вдосконалення котельного обладнання із простими конструктив-

ними елементами та забезпеченням високих енергетичних показників.

Для підвищення наочності термо- та аеропроектів та можливості аналізу результатів досліджень з метою вдосконалення обладнання запропоновано дві графічні моделі подання динаміки термо- та аеропроектів на основі коефіцієнтів опорів та коефіцієнтів динамічності. Нові моделі вимагають переосмислення та переробки законів, що описують процеси динаміки різного роду енергетичних процесів. Забезпечення подібності та уніфікації динаміки електро-, термо- та аеропроектів дозволять коректно поєднувати зміни енергетичних параметрів та коефіцієнтів пропорційності динаміки та потенціалів при виконанні завдань удосконалення каналів обладнання та систем. Наочні енергетичні моделі повинні спростити аналіз результатів під час пошуку рішень, які забезпечують підвищення теплової потужності різного енергетичного устаткування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: котли газотрубні, потужність, термо- та аеропроекти, опори та динамічність, вдосконалення.

THERMAL AND AERO MODELS OF GAS TUBE BOILER PROCESSES



ABSTRACT

Providing residential complexes with electrical and thermal energy is becoming one of the priorities of Ukraine. Destruction of the infrastructure of residential complexes requires prompt restoration of energy systems. Gas-tube boilers are a good option for quickly installing thermal generation in both residential and industrial complexes. The main feature of such boilers is the organization of the dynamics of thermal and aero processes in pipes with hot flue gases. Numerous studies indicate problems with ensuring the intensification of heat transfer at the gas-metal interface and analyzing the results when comparing changes in thermal and aero processes. Ambiguities in the analysis of energy changes provide conflicting recommendations for the development of new boiler designs.

The aim is to increase the power and improving the energy performance of gas-tube boilers by intensifying heat exchange during heat transfer at the gas-metal interface, ensuring moderate changes in the resistance of the elements of the gas path of the boilers. The need for massive restoration of heat supply systems for residential complexes makes the issue of improving boiler equipment with simple structural elements and ensuring high energy performance relevant.

To increase the visibility of thermal and aero processes and the possibility of analyzing research results in order to improve equipment, two graphical models for representing the dynamics of thermal and aero processes based on resistance coefficients and dynamism coefficients are proposed. New models require rethinking and reworking of laws representing the dynamics of various types of energy processes. Ensuring similarity and unification of the dynamics of electrical, thermal and aero processes will make it possible to correctly combine changes in energy parameters and proportionality coefficients of dynamics and potentials when performing tasks of improving equipment channels and systems. Visual energy models should simplify the analysis of results when searching for solutions to increase the thermal power of various energy equipment.

KEYWORDS: gas-tube boilers, power, thermal and aero processes, resistance and dynamics, improvement.

ВСТУП

Забезпечення житлових комплексів електричною та тепловою енергією стає одним із пріоритетних завдань України. Перерви електро- та теплопостачання через природні катаклізми ще кілька десятиліть тому розглядалися як форс-мажор. Однак, у період воєнної агресії масова руйнація енергетичної інфраструктури міст потребує оперативного відновлення систем опалення. Швидким та економічним варіантом виготовлення та встановлення обладнання для

генерації тепла можна вважати газотрубні котли (ГТК).

Відмінності газотрубних котлів від водотрубних згідно з ГОСТ 23172-78 [1] у тому, що в трубах необхідно забезпечити рух продуктів згоряння палива з високою температурою. Рух та нагрівання води необхідно організовувати у міжтрубному просторі. Головними перевагами ГТК є швидке виготовлення; використання простих видів сталі, що знижує собівартість виготовлення у поєднанні зі швидкою установкою та простою управління та обслуговування. Історія використання ГТК налічує вже кілька століть від паровозів та пароплавів до сучасних котельні різних фірм: Veretta, Ferroli, Lamborghini в Італії, Bosch у Німеччині та Колві в Україні. Незважаючи на довгу історію використання ГТК, залишається низка проблем, які потребують наукових досліджень з метою покращення енергетичних процесів.

Однією з головних проблем ГТК є необхідність інтенсифікації теплообміну під час передачі тепла на межі газу – металу. Перешкодою вирішення цієї проблеми є непропорційно велике зростання опорів елементів газового тракту котлів, особливо у місцях, де виконуються технічні заходи з метою інтенсифікації коефіцієнтів тепловіддачі. Незважаючи на численні дослідження з метою інтенсифікації теплообміну, рекомендації для вдосконалення газотрубних котлів мають багато різночитань [2] та невизначеностей [3, 4].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Потреба масового відновлення систем забезпечення житлових комплексів теплом робить актуальним питання вдосконалення котельного обладнання із простими конструктивними елементами та забезпеченням високих енергетичних показників [5]. Огляд результатів досліджень на тему збільшення теплової потужності котлів за рахунок інтенсифікації теплообміну дозволив виділити чотири види заходів та використання пристроїв для підвищення коефіцієнта тепловіддачі на межі метал – газ: 1 – у трубі виконується внутрішнє ребро; 2 – вставка в газотрубний простір кручених стрічок, петель та інших турбулізаторів; 3 – труби виконують гофрованою або крученою геометрією; 4 – труби всередині або зовні можуть мати виступи чи заглиблення [5].

У статті розглянуто питання збільшення теплопередачі та зміни коефіцієнта тертя для простих методів використання скручених стрічок або спіралей у трубах. У більшості випадків коефіцієнти збільшення тепловіддачі для газів знаходяться в межах 2 - 4, при цьому збільшення коефіцієнта тертя зазвичай істотно вище, ніж коефіцієнт тепловіддачі [6, 7] і може бути більше 10. Всі чотири варіанти інтенсифікації



теплообміну пов'язані зі зміною геометрії проточних частин, але поки що найпростіший варіант використання спіралей дає найбільше збільшення коефіцієнта тертя [8, 9]. Це приводить до збільшення витрат енергії на роботу нагнітача повітря. Результати численних досліджень теплообміну зазвичай є відношенням отриманих коефіцієнтів тепловіддачі при використанні турбулізації α_i до коефіцієнтів звичайних труб α_0 , а також ставленням коефіцієнтів аероопорів R або f . У табл. 1 показано збільшення динаміки тепла та, відповідно, коефіцієнтів тепловіддачі (α_i / α_0) та коефіцієнтів тертя (f_i / f_0) у трубах.

Можна виділити два основні висновки з аналітичних оглядів різних варіантів інтенсифікації теплообміну:

- 1 – кількість досліджень кручених стрічок і простих спіралей у кілька разів перевищує сумарну кількість інших варіантів посилення теплообміну.
- 2 – широкий діапазон невизначеності при спробах визначити кореляцію співвідношення коефіцієнта теплопередачі та коефіцієнта тертя для різних режимів як для вставлених стрічок, так і для вихрових генераторів.

При представленні всіх варіантів досліджень фіксується поліпшення теплообміну як головний фактор, а значне збільшення аероопорів і підвищення витрат енергії на втрати тиску – як супутня проблема. Отже, важливо кількісно та наочно уявити спільні зміни параметрів динаміки термо- та аеропроектів даного методу поліпшення.

Окремо слід зазначити роботи про можливість збільшення інтенсивності теплообміну в 2 рази і більше за незначного збільшення втрат в аеросистемі [10, 11]. Результати успішного використання запропонованого методу збільшення динаміки теплових процесів представлені у трубах змінного перерізу [12, 13].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою роботи є розробка моделей представлення параметрів термо- та аеропроектів в еле-

Таблиця 1 – Діапазон збільшення динаміки у вигляді зміни коефіцієнтів перенесення теплоти α_i / α_0 та зміни коефіцієнтів опорів f_i / f_0 руху газів

	Метод збільшення теплообміну	Діапазон зміни α_i / α_0	Діапазон зміни f_i / f_0
1	Внутрішнє ребріння труб	1 - 6	1,5 - 14
2	Кручені стрічки або спіралі в трубі	1,5 - 6	2 - 200
3	Гофрування труб	1 - 3	1,5 - 10
4	Виступи або поглиблення у трубах	1 - 4	1 - 8

ментах котлів для спрощення та наочного аналізу зміни динамічних процесів у рамках одного виду енергії.

Зміна питомої потужності котлів у межах певних конструктивних розмірів може виконуватися за допомогою вдосконалення геометрії проточних частин, що впливає на термо- і аеропараметри. Тому головним завданням досліджень є забезпечення сумісності змін термо- та аероопорів (при зміні геометрії проточних частин) для формування позитивних змін балансу енергетичних процесів у котлах.

Для аналізу процесів котлів доцільно вирішити задачу розробки порівняних термо- та аеромоделей, які зможуть уявляти (описувати) динаміку процесів різного енергетичного призначення. Пріоритетом виконання поставлених завдань має бути пошук наочної та логічної подоби математичного та графічного зображень динаміки різних видів енергії.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

Для можливості наочного аналізу результатів розв'язання задач покращення теплообміну з одночасною помірною зміною аероопорів у газотрубному просторі котлів розроблено дві моделі енергетичних процесів: 1 – модель перенесення тепла через металеву стінку; 2 – модель руху газів. На рис. 1 представлена схема котла Колві, де позначені етапи динамічних процесів різної природи (термо- та аеропроекти).

Вхід і вихід води в котлі позначені цифрою 1, оскільки необхідно обґрунтування напряму руху води в корпусі. Подача газу 2 і повітря 3 формують зону горіння 4. Об'єктом досліджень є тракт 5 – 11 руху продуктів горіння в котлі від жарової труби до виходу 12 до димової труби.

У статті розглянуто два процеси: 1 – теплообмін області точки 10 від димових газів із температурою 200°C через стінку труби до води температурою 50°C; 2 – рух димових газів від ділянки 7 – 8 (тертя газів об стінку жарової труби), поворот потоку на 180°C (точки 8 – 9) та ділянка 9 – 10 у трубі, де необхідно вирішити проблему покращення теплообміну на межі газ – метал.

Аналіз численних досліджень на тему інтенсифікації теплообміну в газотрубних котлах показав, що у трубах з димовими газами часто встановлюють вставки зміни динаміки потоків, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі межі газ – стінка. Однак це призводить до непропорційного збільшення коефіцієнта тертя. На рис. 2 показаний розріз котла Колві, де основним проблемним елементом можна вважати труби зі спіральними вставками для покращення теплообміну на межі газ – стінка.

Вже є достатній досвід зниження опорів в елементах аеросистем із використанням

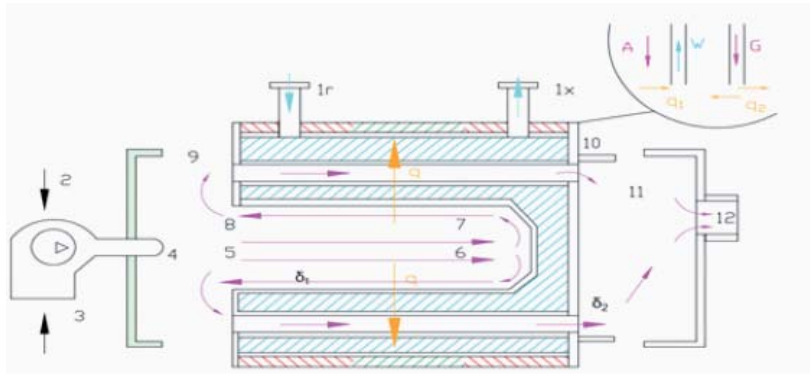


Рисунок 1 – Схема газотрубного котла та динаміки аеро- та термопроцесів



Рисунок 2 – Спіральні вставки для покращення теплообміну в газотрубних котлах:

- а – розріз термочастини котла Колві;
- б – вставка-спіраль для інтенсифікації теплообміну

візуальної діагностики структури потоків [14]. Зниження аероопорів допоможе вирішити поставлене завдання вдосконалення котлів. Важливим чинником, який може прискорити впровадження пропозицій, можна вважати розробку наочних графічних моделей та методів представлення енергетичних процесів та технологій, які наочно представляють позитивний вплив зниження термо- і аероопорів на енергетичні показники котлів. Графічні моделі повинні відображати суть енергетичних явищ різної природи та показувати логіку та сумісність математичних та графічних уявлень процесів.

У сучасних уявленнях про енергії різної природи завжди можна виділити дві компоненти: потенціал P та динаміку D . Потенціалами P у гідро- та аеросистемах є тиск P ; для змін теплоти – температура T ; для електрики напруга – U . Саме потенціали є першопричиною формування руху тепла, потоків, електрики. Динамікою D (грецька - робота, рух) або динамічною складовою енергії сьогодні є: кількість руху у вигляді подачі Q [м³/с] або маси, що переміщується, M [кг/с]; для термічних змін повинна пред-

ставлятися на основі кількості речовини з урахуванням теплоємності c ; для електрики – сила струму – I [Ампер]. В рамках закону збереження енергії показник потужності N розраховується як добуток потенціалу та динаміки $N = P \cdot D$ (рис. 3а).

Уніфікація одиниць вимірювання потужності (Ватт – W) дала можливість розробити коефіцієнт ефективності як відношення початкової N_1 і кінцевої N_2 величин потужності різних видів енергії (рис. 2б). Коефіцієнт ефективності $\eta = N_2 / N_1$ забезпечує наочність розв'язання задачі підвищення якості роботи енергетичних технологій, тому ефективності котлів, турбін, насосів мають значення $\eta > 0,85$.

Багато проблем енергетичних технологій можна пов'язати з впливом на якість енергетичних процесів коефіцієнтів опору, що залишаються невиправдано великими. У ряді випадків виконання робіт з метою зниження опорів призводить до парадоксального зниження ефективності головного елемента системи (вентилятори, компресори)

за межі допустимих значень, призначених у правилах проектування [15]. У розрахунках показника потужності і ККД або ефективності коефіцієнти опорів відсутні. Для відображення впливу опорів на енергетичні процеси доцільно виконати аналіз поняття динаміки D , яка прямо пропорційна сумі сил чи потенціалів P та обернено пропорційна величинам опорів R :

$$D = P / (R + 1) \quad (1)$$

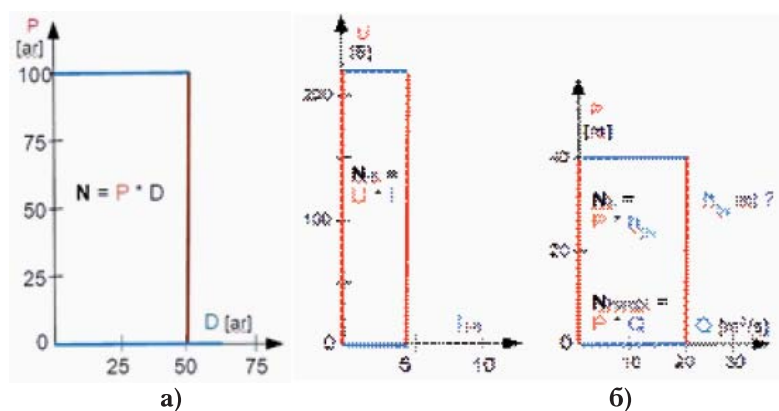


Рисунок 3 – Модель розрахунку та зіставлення потужності – енергії різної природи

- а – модель розрахунку потужності як добуток потенціалу та динаміки;
- б – аналіз трансформації енергії в компресорі з використанням показника потужності



У існуючих моделях, гіпотезах, законах (на відміну від закону збереження енергії, де потенціал Π і динаміка D перемножуються) опір R показує обернено пропорційну залежність двох основних компонент. Для електрики це закон Ома $I = U / R_{ef}$; для теплових процесів – гіпотеза Фур'є та закон Ньютона $q = \Delta T / R_r$. Для представлення динаміки в гідро- та аеросистемах використовують формулу Торрічеллі:

$$V = \frac{\sqrt{2k\Delta P}}{\sqrt{R+1}} \quad (2)$$

На відміну від законів Ньютона та Ома у формулі Торрічеллі нелінійна залежність між величиною швидкості та компонентом потенціалу. Однак, якщо формулу Торрічеллі виразити через складові рівняння Бернуллі, можна буде виділити динамічний компонент питомої енергії $h_{dy} = kV^2/2$. Динамічна складова енергії h_{dy} лінійно співвідноситься з потенціалом. Ще одна особливість формули розрахунку динамічної складової гідрота аеросистем – опір використовується з різними коефіцієнтами, близькими до одиниці:

$$h_{dy} = \Delta P / (R + I) \quad (3)$$

Використання коефіцієнта гідроопорів разом з одиницею $(R + I)$ можна пояснити тим, що при зниженні опору до нуля показник динаміки не буде прагнути нескінченності, як це відбувається в електриці, де при малих опорах можливе явище короткого замикання. Але потрібне пояснення – чому немає одиниці у законі Ньютона.

Коефіцієнти опорів, як термічні, так і в аеросистемі, відіграють важливу роль при розрахунках та виконанні аналізу динаміки процесів в обладнанні. Для поліпшення наочності моделювання як теплових, так і аеропроектів доцільно розділити поняття коефіцієнт опорів і коефіцієнт динамічності. Коефіцієнти тепловіддачі α [W/m²K] наочно показують кількість тепла на одиницю простору та на одиницю вимірювання потенціалу (температури). Їх можна назвати провідністю чи динамізмом перенесення теплоти. Однак, для розрахунку питомого потоку теплоти q [W/m²] використовують коефіцієнти опорів усіх елементів $R_i = I / \alpha_i$. Тільки після розрахунку теплового потоку можна розрахувати значення температур у проміжних точках процесу з використанням коефіцієнтів тепловіддачі α або коефіцієнтів теплопровідності λ . На рис. 4 показано два варіанти моделі теплових процесів на основі закону Ньютона: 1 модель – з використан

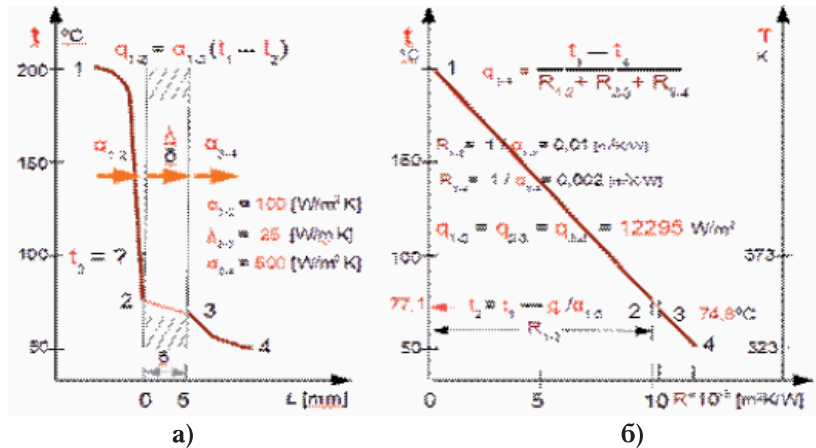


Рисунок 4 – Модель перенесення руху тепла через стінку при $\alpha_{1,2} = 100$ Вт/м²К

а – модель динаміки з коефіцієнтами провідності тепла;

б – модель динаміки з коефіцієнтами опорів під час руху тепла

ням коефіцієнтів тепловіддачі α ; 2 модель – з використанням коефіцієнтів опорів $R = I / \alpha$.

Тобто, використовуючи коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{1,2}$ та $\alpha_{3,4}$ теплопровідності $\lambda_{2,3}$ під час руху тепла через стінку, немає можливості розрахувати кількість тепла та розподіл температур у різних точках переміщення теплової енергії (рис. 4а). Модель закону Ньютона до розрахунку потоку теплоти передбачає використання суми опорів $R = R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,4}$. Представлена графічна модель теплових процесів, що складається з двох графіків, може використовуватися як комплекс графічного методу визначення значень потоку теплоти та розподілу температур у різних точках процесу. Модель теплових процесів може використовуватись для моделювання зміни параметрів (ув'язування параметрів теплової системи). У разі використання турбулізатора – спіралі для інтенсифікації теплообміну – коефіцієнт тепловіддачі з боку димових газів може бути збільшений до $\alpha_{1,2} = 200$ Вт/м²К і більше. Модель динаміки тепла дозволяє виявити перерозподіл температур у різних точках теплового процесу без додаткових розрахунків. При зниженні термоопору від $R_{1,2} = 10 \cdot 10^{-3}$ до величини $R_{1,2} = 5 \cdot 10^{-3}$ динаміка тепла збільшиться від $q = 12295$ Вт/м² до $q = 20833$ Вт/м².

Для можливості спільного аналізу змін динаміки теплих та аеропроектів розроблена модель динаміки аеропроектів, подібна до моделі динаміки теплових процесів (подібна до двох різних видів прояву енергії). Як модель гідрота аеропроектів використаний метод професора Ботука Б.О. [16, 17], де на основі законів руху води (рівняння Бернуллі та формула Торрічеллі) сформульовано метод розрахунку динаміки потоків з урахуванням опорів та розрахунку втрат тиску (графічна ув'язка параметрів гідросистеми). У моделі аеросистеми досліджено процес руху димо-

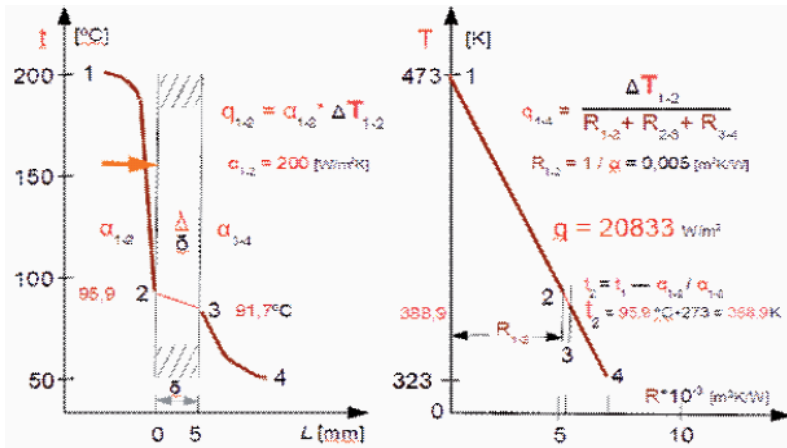


Рисунок 5 – Модель динаміки перенесення тепла через стінку 1-2 = 200 Вт/м²К

а) б)

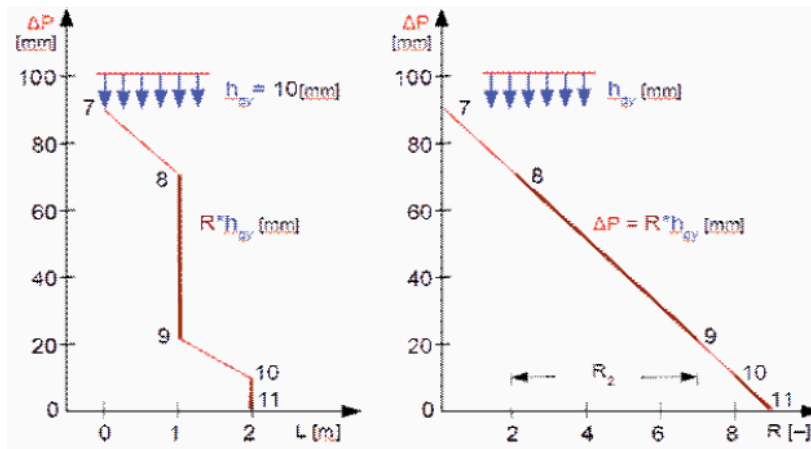


Рисунок 6 – Модель динамічних процесів в аеросистемі при $\Sigma R = 9$:

а – модель втрат тиску (місцевих та за довжиною);
б – модель динаміки з коефіцієнтами опорів.

вих газів у котлі: тертя газів об стінку жарової труби між струмами 7 – 8, поворот потоку на 180° між струмами 8 – 9 та рух газів у трубі на ділянці 9 – 10, де сумарний термоопір $R = 9$.

Аналіз представленої моделі дає змогу визначити те, що кожна одиниця коефіцієнта опору показує кратність втрати динамічної складової енергії. При сумарному опорі $\Sigma R = 9$ динамічна складова енергії становить лише 10 % від вихідного потенціалу $P = 100$ [мм = ДаПа]. Використання вставки-турбулізатора для інтенсифікації тепловіддачі може призвести до збільшення аероопорів. Для збереження балансу в аеросистемі можна використовувати метод удосконалення геометрії повороту потоку, який може зменшити опір у повороті потоку на 180° (т. 8 – 9) від $R_{2,1} = 5$ до $R_{2,2} = 2$ і менше. Таке зни-

ження опору компенсує збільшення сумарного опору аеросистеми через вставку. Модель динамічних процесів дає можливість виконати моделювання та наочний аналіз зміни термо- та аеропараметрів системи.

При зниженні опору повороту 180° від $R_{2,1} = 5$ до величини $R_{2,2} = 2$ динамічна складова збільшиться на 40 % і становитиме 14 % від величини повного тиску $P = 100$ мм. Така зміна динаміки системи дозволить використовувати вставки в газовій трубі для інтенсифікації теплообміну без змін балансів теплової, аеро- та електричної енергії під час роботи котла. Використання запропонованих моделей динаміки може дозволити моделювати та аналізувати заходи з метою збільшення потужності котла із забезпеченням покращення комплексу енергетичних параметрів.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБОК

Пошук варіантів підвищення теплової потужності котлів забезпечується зміною геометрії проточних частин, що має позитивно впливати на динаміку як термо-, так і аеропроектів. Збільшення потужності котлів виражають формули розрахунку у межах закону збереження енергії. При цьому досягти результату збільшення потужності легше зменшенням опорів. Опір є коефіцієнтами пропорційності між двома компонентами енергії: потенціал P та динаміка D . Потенціалом можна вважати суму сил, а динаміка може представляти результуючу кількість руху. Тому, основою подальшої розробки моделей динаміки термо- та аеропроектів можуть

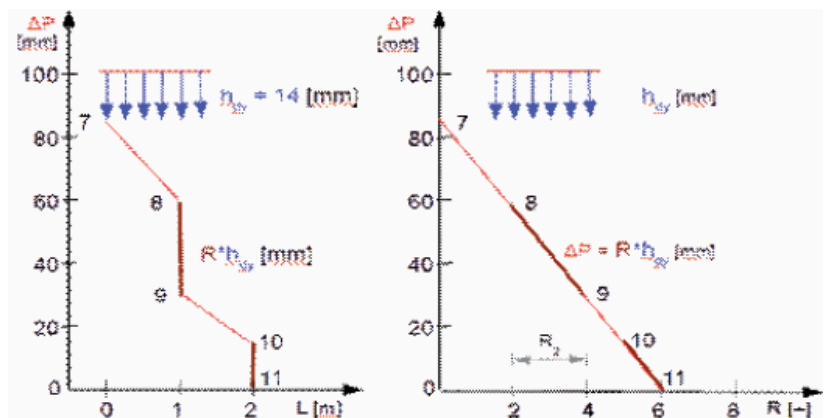


Рисунок 7 – Модель динамічних процесів в аеросистемі при $\Sigma R = 6$



бути базові положення закону імпульсів.

Для представлення та аналізу процесів в окремих елементах котлів розроблено дві графічні моделі термо- та аеропроектів, які спільно становлять енергетичні та динамічні зміни параметрів. Подібність графічних термо- та аеропроектів дозволить прогнозувати та наочно аналізувати варіанти технічних рішень збільшення теплової потужності котлів за рахунок інтенсифікації теплообміну, при збереженні прийняттого рівня витрат енергії на роботу вентиляторів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Поверхня нагріву котла. Вікіпедія. Вільна енциклопедія. https://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхня_нагріву_котла
2. Бонар Л.А. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності: автореферат. Київ: Вінницький національний технічний університет., 2010. 21с.
3. W.T. Ji, A.M. Jacobi, Y.L. He, W.Q. Tao. Summary and evaluation on single-phase heat transfer enhancement techniques of liquid laminar and turbulent pipe flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. № 88. С. 735–754.
4. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Huminic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. № 130. С. 1032-1044.
5. R.M. Manglik, A.E. Bergles. Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: part I—laminar flows. *Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme*. 1993. № 115. С. 881–889.
6. R.M. Manglik, A.E. Bergles. Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part II—Transition and turbulent flows. *Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme*. 1993. № 115 (4). С. 890–896.
7. S.W. Chang, T.L. Yang, J.S. Liou. Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007. № 32 (2). С. 489–501.
8. S.W. Chang, Y.J. Jan, J.S. Liou. Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. № 46 (5). С. 506–518.
9. M. Bhuiya, M. Chowdhury, M. Saha, M. Islam. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. № 46. С. 49–57.
10. A. Harleß, E. Franz, M. Breuer, Experimental investigation of heat transfer and friction characteristic of fully developed gas flow in single-start and threestart corrugated tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016. № 103. С. 538–547.
11. Барон В.Г. Кожухотрубные теплообменные аппараты конца XX века. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Одесса. 2000. № 2(5). С. 34-36.
12. Дрейцер Г.А. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах. *Инженерно-физический журнал*. 2000. Т. 74. № 4. С. 33-40.
13. Барон В.Г. Тонкостенные теплообменные аппараты интенсифицированные. Общий анализ ситуации. «Энергосбережение». 2002. № 7. С. 20-22.
14. Vasyi Arsirii, Oleg Kravchenko, Bohdan Savchuk and Olena Arsirii. The influence of the structure of laminar flows on the characteristics of equipment. 26th Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines (PEPM'2021). E3S Web Conf. Volume 327. 2021. Article Number 05003.
15. Vasyi Arsirii. Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2018 № 2. Volume 22. С. 397-404
16. Ботук Б.О. Гидравлика. Москва: «Высшая школа», 1962.
17. Ботук Б.О., Федорів Н. Ф. Каналізаційні мережі. Навчальний посібник для студентів вузів. Видання 2. 1977.

REFERENCES

1. Wikipedia. (2017). Boiler heating surface. https://en.wikipedia.org/wiki/Boiler_heating_surface
2. Bonar, L.A. (2010). Energy and environmental efficiency of small-capacity water boilers. Kyiv: Vinnytsia National Technical University.
3. Ji, W. T., Jacobi, A. M., He, Y. L., & Tao, W. Q. (2015). Summary and evaluation on single-phase heat transfer enhancement techniques of liquid laminar and turbulent pipe flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 735–754.
4. Nikulin, A., Moita, A. S., Moreira, A. L. N., Murshed, S. M. S., Huminic, A., Grosu, Y., Faik, A., Nieto-Maestre, J., & Khliyeva, O. (2019). Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient, and turbulent flow of isopropyl alcohol. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 1032–1044.
5. Manglik, R. M., & Bergles, A. E. (1993). Heat transfer and pressure drop correlations for



- twisted-tape inserts in isothermal tubes: part I—laminar flows. *Journal of Heat Transfer-Transactions of The Asme*, 115, 881–889.
6. Manglik, R. M., & Bergles, A. E. (1993). Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part II—Transition and turbulent flows. *Journal of Heat Transfer-Transactions of The Asme*, 115(4), 890–896.
 7. Chang, S. W., Yang, T. L., & Liou, J. S. (2007). Heat transfer and pressure drop in a tube with broken twisted tape insert. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), 489–501.
 8. Chang, S. W., Jan, Y. J., & Liou, J. S. (2007). Turbulent heat transfer and pressure drop in a tube fitted with serrated twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(5), 506–518.
 9. Bhuiya, M., Chowdhury, M., Saha, M., & Islam, M. (2013). Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46, 49–57.
 10. Harleß, A., Franz, E., & Breuer, M. (2016). Experimental investigation of heat transfer and friction characteristics of fully developed gas flow in single-start and three-start corrugated tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 103, 538–547.
 11. Baron, V.G. (2000). Shell-and-tube heat exchange apparatus at the end of the 20th century. *Non-Traditional and Renewable Energy Sources*, 2(5), 34-36.
 12. Dreytser, G.A. (2000). Modern problems of heat transfer intensification in channels. *Engineering Physics Journal*, 74(4), 33-40.
 13. Baron, V.G. (2002). Thin-walled heat exchange apparatus: intensification and general analysis of the situation. *Energy Conservation*, 7, 20-22.
 14. Arsirii, V., Kravchenko, O., Savchuk, B., & Arsirii, O. (2021). The influence of the structure of laminar flows on the characteristics of equipment. In 26th Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines (PEPM'2021) (Vol. 327, Article Number 05003). E3S Web Conf.
 15. Arsirii, V. (2018). Reconstruction of turbomachines on the basis of flow structure visual diagnostics. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 22(2), 397-404.
 16. Botuk, B.O. (1962). *Hydraulics*. Moscow: "Higher School".
 17. Botuk, B.O., & Fedoriv, N.F. (1977). *Sewage Networks*. Educational manual for university students. 2nd Edition.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2023 року