

ТЕРМО- І АЕРОМОДЕЛІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЖИТЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ

¹**Арсирій В.А.**, д.т.н., професор,
vasyly.arsiriy@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3617-8487

¹**Крошка О.В.**, аспірант,
Kolvi@epg.kolvi.com, ORCID: 0000-0003-0975-3079
¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Під час аварій або руйнувань інфраструктуру житлових комплексів при низьких температурах потрібно у стислий термін відновлювати, особливо роботу систем теплопостачання. Для цього зручно використовувати газотрубні котли. Але потрібні нові рішення проблем підвищення потужності та енергоефективності обладнання та систем за рахунок зменшення опорів руху рідини або газів, а також інтенсифікації теплопередачі. Численні дослідження показали, що збільшення коефіцієнта тепловіддачі на кордоні газ – метал у 5 разів призводить до збільшення витрат енергії вентиляторів котла у 10 разів і більше. У статті використано три методи досліджень з метою покращення показників роботи котлів. Візуальна діагностика руху рідин та газів дозволила виявити ознаки самоорганізації структури потоків. Гідравлічні дослідження в щілинних каналах, де змінювалася лише висота h у діапазоні $h = 0,2-2,5$ мм підтвердили, що структура розподілу пульсаційних компонентів динамічної частини енергії впливає на збільшення або зменшення швидкості при заданому початковому тиску потоку або $Re = const$.

Тепловий експеримент показав, що структура потоку також впливає на характер зміни коефіцієнта тепловіддачі α . Розміри каналів, при яких пульсаційні компоненти мають позитивні значення, дають збільшення коефіцієнта тепловіддачі набагато інтенсивніше, ніж при розмірах, де пульсації мають негативні значення. Тобто, візуальні дослідження структури потоків та правильний вибір поперечних розмірів каналів може збільшити подачу теплоносія до 24% без додаткових витрат енергії, а також усунути проблему невизначеності при вирішенні задачі інтенсифікації перенесення теплоти на межі газів – металева стінка.

Візуальні дослідження струменя у затопленому просторі дають інформацію для вирішення задачі інтенсифікації теплообміну. Використання турбулізаторів у газотрубних котлах забезпечило підвищення ефективності котла від $\eta_{к.1} = 0,84$ до величини $\eta_{к.2} = 0,929$. При цьому, витрати енергії на роботу вентилятора змінилися незначно. Використання візуальної діагностики структури потоків дозволяє вирішувати гідравлічні і теплові завдання розробки чи вдосконалення енергетичного обладнання житлових комплексів.

Ключові слова: житлові комплекси, котли, потужність, енергоефективність, теплопередача, температура, коефіцієнт тепловіддачі, тиск, опір, моделювання, удосконалення.

Вступ. Для відновлення теплопостачання житлових комплексів у продовж 24 годин після аварій чи руйнувань зручно використовувати газотрубні котли (ГТК). Простота котлів, де в трубах рухаються димові гази, забезпечує економічне та швидке виготовлення, а також спрощує профілактичні роботи. Ці якості дають пріоритет ГТК за необхідності швидкого встановлення котлів у період руйнувань інфраструктури. Однак, необхідно відзначити проблему низьких значень перенесення теплоти в них (коефіцієнтів тепловіддачі) від димових газів до стін трубного простору. Ця проблема обмежує теплову потужність даного типу котлів.

Можна відзначити велику кількість досліджень з метою інтенсифікації теплообміну на кордоні газ – металева стінка, але збільшення перенесення тепла супроводжується

непропорційним збільшенням витрат енергії на переміщення газів. Тому актуальним завданням є розробка методів інтенсифікації тепловіддачі за умови забезпечення помірної зміни опорів в аеросистемі котла.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомі численні дослідження, завдання яких покращити процеси перенесення теплоти. Актуальність та складність розв'язання цього завдання добре представлені в огляді, де наведено результати понад 430 досліджень [1, 2]. Дослідження теплообміну зазвичай розглядають зміну коефіцієнтів тепловіддачі при використанні турбулізаторів α_i , при цьому треба досліджувати зміни коефіцієнтів опорів f або коефіцієнтів гідравлічного тертя λ .

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 границі метал – газ: 1 – у трубі виконується внутрішнє ребро; 2 – вставка в газотрубний простір кручених стрічок, петель та інших турбулізаторів [3]; 3 – труби виконують гофрованої або крученої геометрії; 4 – труби всередині або зовні можуть мати виступи чи заглиблення [4]. Всі чотири варіанти інтенсифікації теплообміну пов'язані зі зміною геометрії проточних частин, але поки що найпростіший варіант використання спіралей дає найбільше збільшення коефіцієнта тертя [5, 6]. Корисна інформація в тому, що більшість дослідників вказують на наявність явно вираженого діапазону невизначеності енергетичних параметрів при проведенні гідравлічних, а також теплових експериментів [7]. А це може приводити до збільшення витрат енергії на роботу вентиляторів. 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 інтенсифікації теплообміну у газових потоках.

2 – прийнято погоджуватись, що є широкий діапазон невизначеності при спробах з'ясувати кореляцію співвідношення коефіцієнта теплопередачі та коефіцієнта тертя для різних режимів як для вставлених стрічок, так і для вихрових генераторів.

Мало уваги приділено дослідженням із регулярними вставками у газові труби, які забезпечують збільшення тепловіддачі з незначним збільшенням опорів [8]. Візуалізація потоків не достатньо розглядається для вирішення гідравлічних і теплових завдань [9, 10]. У статті виконано спробу ув'язати нову інформацію про структурування потоків, отриману методами візуалізації з вирішенням гідравлічних та теплових завдань, спрямованих на покращення енергетичних показників різного обладнання.

Мета роботи: покращення енергетичних показників котлів за рахунок інтенсифікації теплообміну при передачі тепла на границі газу – металева стінка із забезпеченням зниження опорів елементів газового тракту котлів.

Завдання досліджень:

1. Розробити гідравлічний експеримент для дослідження зміни величини коефіцієнта гідравлічного тертя при зміні геометрії каналів, порівнянних із розмірами структури потоків, виявленої при візуалізації витікання струменя води в затоплене місце.

2. Розробити експеримент із перенесення теплоти для дослідження зміни величини коефіцієнта тепловіддачі при зміні геометрії каналів, порівнянних з розмірами структури потоків, виявленої при візуалізації витікання струменя води в затоплене місце.

Матеріали та методи досліджень. У статті показано результати досліджень процесів руху рідин та газів для вирішення завдання зниження аеро- та гідравлічних опорів, а також збільшення коефіцієнта тепловіддачі на границі газ – металева стінка.

Основою досліджень є метод візуальної діагностики структури потоків. Також виконані гідравлічні та теплові експерименти, які показали вплив самоорганізації структури потоків на основні енергетичні показники руху рідин та газів та закономірності перенесення теплоти.

Результати досліджень. Енергетичними показниками потоків є потенціали та динамічна складова енергії. Для подання або розрахунку енергії руху рідин і газів використовують рівняння Бернуллі, в якому можна виділити тиск P або потенційну частину

та динамічну складову D , пропорційну квадрату швидкості kV^2 .

Перенесення тепла температура t як потенціал і кількість тепла q як динаміка. Під час проведення досліджень легше скористатися коефіцієнтами пропорційності між головними енергетичними показниками. Під час руху рідин та газів використовують коефіцієнти опорів. Для перенесення тепла використовують два типи показників: коефіцієнт тепловіддачі α , що характеризує пряму залежність динаміки тепла від потенціалу у законі Ньютона $q = \alpha(t_1 - t_2)$. Однак у розрахунках показників перенесення тепла переходять до коефіцієнтів теплових опорів R_t як зворотної залежності головних енергетичних показників $q = (t_1 - t_2) / \Sigma R_t$.

Для розробки пропозицій щодо покращення роботи ГТК використовувалися три типи дослідницьких підходів. Основний метод – візуалізація потоку струменя при ламінарному та турбулентному режимі течій для виявлення геометричних розмірів структури течії рідини. Для визначення впливу організації структури потоків на енергетичні параметри рідин, що рухаються, виконані гідравлічні дослідження, а також експерименти з перенесення теплоти від навколишнього середовища до металеві стінки.

Вплив поперечної структури потоків на коефіцієнти опорів. Причиною проведення експериментів для дослідження енергетичних параметрів потоків стали результати візуальної діагностики руху струменя рідини у затопленому просторі [11]. На рис. 1 видно світлі та темні смуги (однорідні шари, які представлені у візуальних експериментах Рейнольдса), які можна характеризувати як позитивні пульсаційні компоненти динамічної складової енергії (світлі смуги – 4) та негативні компоненти (темні смуги – 5).

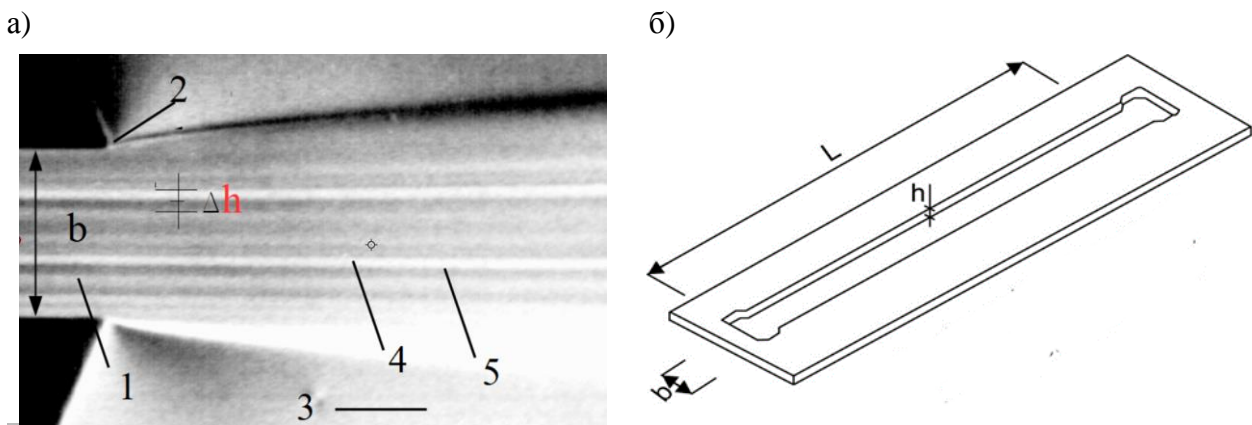


Рис. 1. Візуальна картина та модель для дослідження впливу поперечної структури потоків:
 а – візуальна картина закінчення струменя води в затоплений простір; б – модель для гідравлічних та теплових досліджень впливу структури потоків на енергетичні параметри руху рідини. b – ширина сопла; Δh – розмір світлої та темної смуги структури потоку.
 1 – струмінь; 2 – сопло; 3 – затоплене місце; 4 – світла смуга (позитивний градієнт динамічної складової потоку); темна смуга (негативний градієнт динамічної складової потоку)

Візуальна картина дає нову інформацію про структуру потоків, порівняно з відомими візуальними дослідженнями струменя в затопленому просторі [12, 13]. Для перевірки відповідності візуальної картини структури потоків зміні енергетичних параметрів потоків розроблено та проведено декілька гідравлічних та теплових експериментів. Ідея паралельного проведення експериментів була у незалежному виявленні впливу структури потоків на енергетичні параметри руху рідини чи газів. У лабораторії Одеської державної Академії холоду (ОДАХ) у 2002 році було виконано суміщений гідравлічний та тепловий експеримент без акцентів на візуальні дослідження структури потоків [14]. В Одеській державній академії будівництва та архітектури (ОДАБА) виконувався лише гідравлічний експеримент із чіткою прив'язкою до результатів виявленої структури [15]. Завдання досліджень – визначення залежності зміни витрати Q або швидкості потоку V в заданому діапазоні тисків ($P = 5 - 40$ кПа) при дискретній зміні тільки висоти каналу h [мм]. Наглядним показником зміни

динамічної складової енергії потоку $D = kV^2 = f(P)$ є коефіцієнт гідравлічного тертя λ . Шорсткість поверхні каналів під час проведення експериментів не змінювалася. Тому для ламінарного режиму перебігу експериментальні результати залежності коефіцієнта тертя від числа Рейнольдса потрібно порівнювати з лінією, яка розраховується за формулою Пуазейля $\lambda = 64/Re$; при числах $Re > 5000$ результати потрібно порівнювати з лінією, яка розраховується за формулою Блазіуса $\lambda = 0,3164/Re^{0,25}$. На рис. 2 показані результати двох гідравлічних експериментів у двох різних лабораторіях з метою дослідження залежності коефіцієнта гідравлічного тертя λ від числа Рейнольдса при різних дійсних значеннях висоти каналу h .

$$\lambda = f(Re) \text{ при } h = (0,4 \div 2,5) \text{ мм} \tag{1}$$

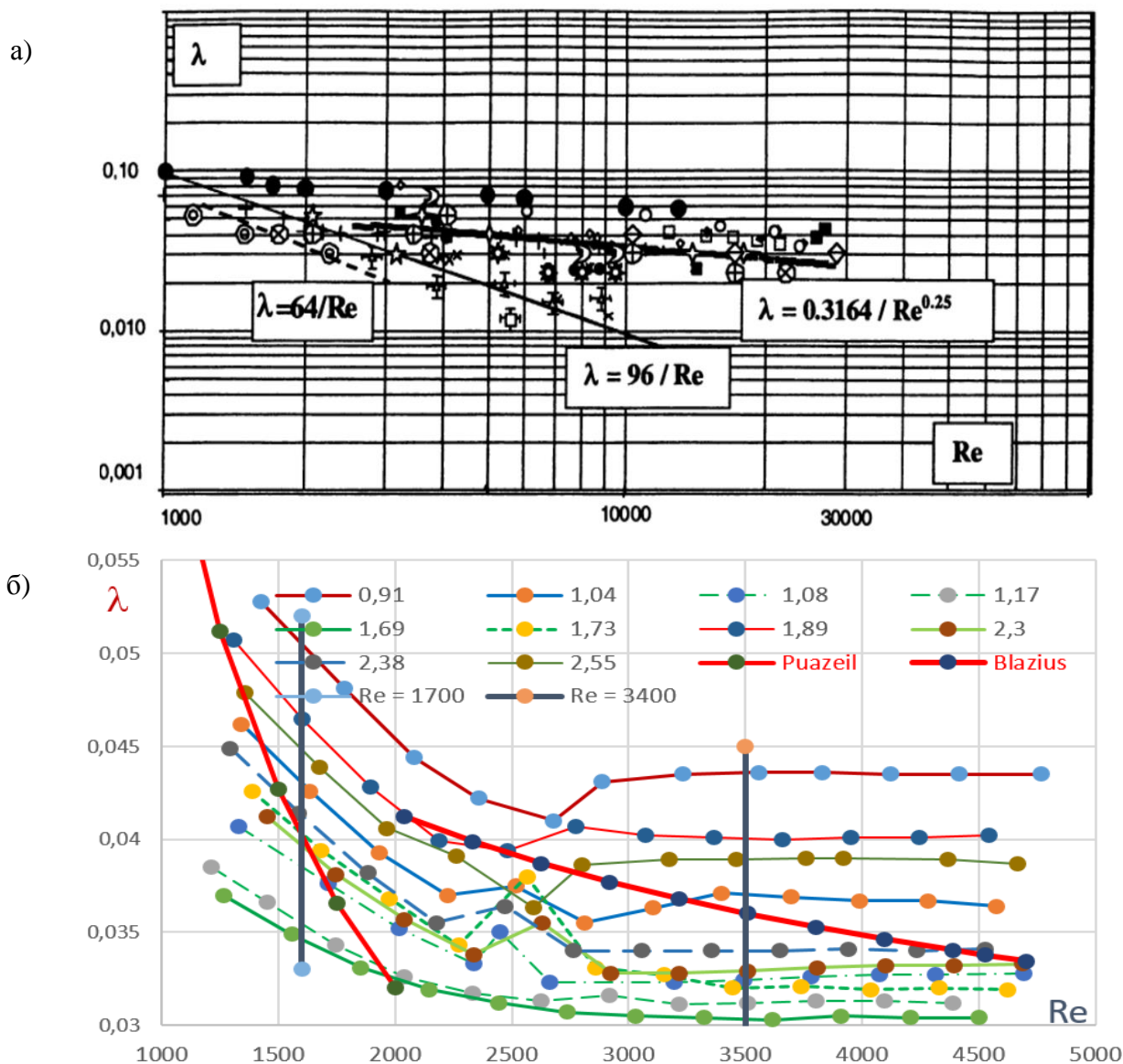


Рис. 2. Залежність коефіцієнта гідравлічного тертя λ від числа Рейнольдса при русі води в щільних каналах при різних значеннях висоти каналів h :

а – результати експерименту в ОДАХ при $h = (0,4-2,5)$ мм; б – результати експерименту в ОДАБА при $h = (0,4-2,5)$ мм

Величини зазору – висоти каналу h змінювалися дискретно в діапазоні $h = 0,4 \div 2,5$ мм. В експерименті ОДАХ не було прив'язки до виявлених закономірностей про структуру потоків, тому відхилення значень від залежності Пуазейля і Блазіуса досі видаються як область невизначеності, що також було показано в роботах ОДАХ [14]. Такі уявлення цілком

відповідають парадигмі хаосу турбулентних потоків та методиці опосередкування параметрів. Хоча якщо умовно провести вертикальну лінію для числа Рейнольдса $Re = 1700$ (рис. 2, б), то для поперечного розміру $h = 0,9$ мм коефіцієнт гідравлічного тертя дорівнює $\lambda = 0,09$, а при $h = 1,3$ мм коефіцієнт тертя відрізняється в 3 рази та дорівнює $\lambda = 0,03$. Такий самий діапазон зміни коефіцієнта гідравлічного тертя зберігається, якщо вертикальну лінію провести числа Рейнольдса $Re = 3500$ (рис. 2, б).

В експерименті ОДАБА вибиралися значення висоти каналів h_i , які дозволили виявити відповідність розмірів шарів на візуальних картинах хвильового характеру зміни динамічної складової енергії потоку $D = k\Delta V^2 = f(h)$ при лінійній зміні висоти каналу h (рис. 3) при заданих числах Рейнольдса $Re_1 = 1700$ (ламінарний режим течії) і $Re_2 = 3500$ (турбулентний режим течії).

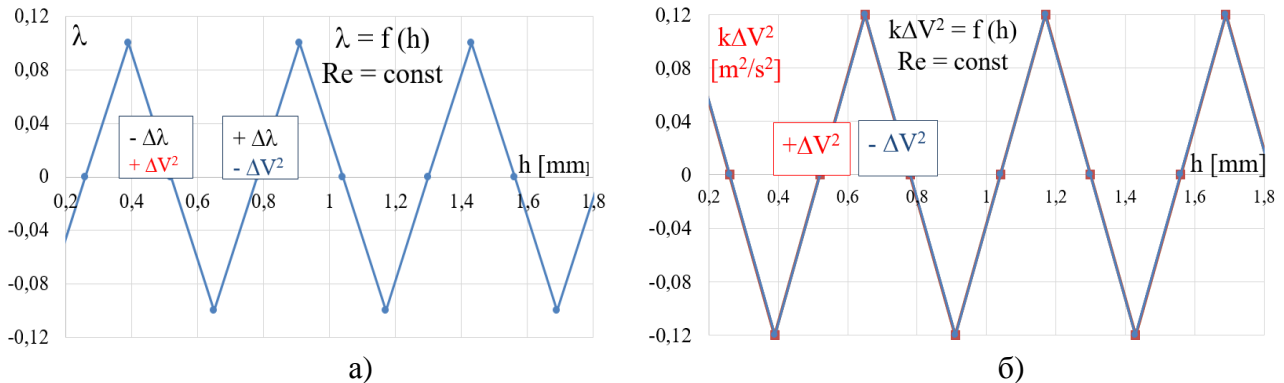


Рис. 3. Зміна коефіцієнта гідравлічного тертя та динамічної складової енергії потоку при лінійній зміні висоти каналів при $Re = 1700$:

а – залежність $\lambda = f(h)$ при $Re = 1700$; б – залежність $k\Delta V^2 = f(h)$ при $Re = 1700$

Тобто, при лінійній зміні розмірів проточної частини реальна швидкість змінюється з урахуванням хвильового характеру зміни динамічної складової енергії потоку $D = kV^2$.

Вплив поперечної структури потоків на коефіцієнт тепловіддачі. Завдання усунення проблеми невизначеності показників перенесення теплоти в каналах щілинних розмірів має особливу актуальність для поліпшення роботи теплообмінних апаратів котлів, систем кліматизації тощо. Головним завданням досліджень у лабораторії ОДАХ у 2002 році був експеримент з визначення коефіцієнта тепловіддачі в щілинних каналах із дискретною зміною висоти в діапазоні $h = 0,4-2,5$ мм [14]. Тепловий потік Q у каналах визначався електричною потужністю $Q \Rightarrow N_{\text{ел}} = U \cdot I$ [Вт] з одностороннім підведенням тепла в щілинних каналах. Величина питомого теплового потоку змінювалася в експериментах до величини 200Вт. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі розраховувався за формулою:

$$\alpha = N_{\text{ел}} / [S (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})], \quad (2)$$

де: $N_{\text{ел}}$ – потужність електричного нагрівального елемента; S – площа області нагріву; $t_{\text{ст}} - t_{\text{р}}$ – температура стінки та рідини, які виміряні в експерименті.

На рис. 4 представлені графіки за результатами обробки дослідних даних експериментів з щілинними каналами зі статті [14], а також повного звіту про виконання досліджень. В якості визначального розміру щілинного каналу приймався еквівалентний діаметр, розрахований за формулою $de_{\text{екв}} = 4S/R_{\text{зм}}$, де: S – площа живого перерізу каналу; $R_{\text{зм}}$ – його змочений периметр. Характеристики представлені для дискретних величин висоти каналу $h = \delta$ [мм].

За визначальну температуру приймалася середня по каналу температура рідини. Вплив змінності фізичних властивостей рідини на інтенсивність тепловіддачі враховувалося за допомогою поправки $(Pr_p/Pr_{cm})^{0.25}$ у межах всіх серій дослідів, проведених на щілинних каналах, її величина набула значення від 1,0 до 1,2. Автори експерименту в ОДАХ зазначили, що характер зміни чисел Нуссельта від числа Рейнольдса (рис. 4, а) дозволяє зробити висновок про те, що в закономірностях теплообміну для каналів щілинних розмірів менше 0,8 мм спостерігається суттєве відхилення від поширеної залежності М. А. Міхеєва [14].

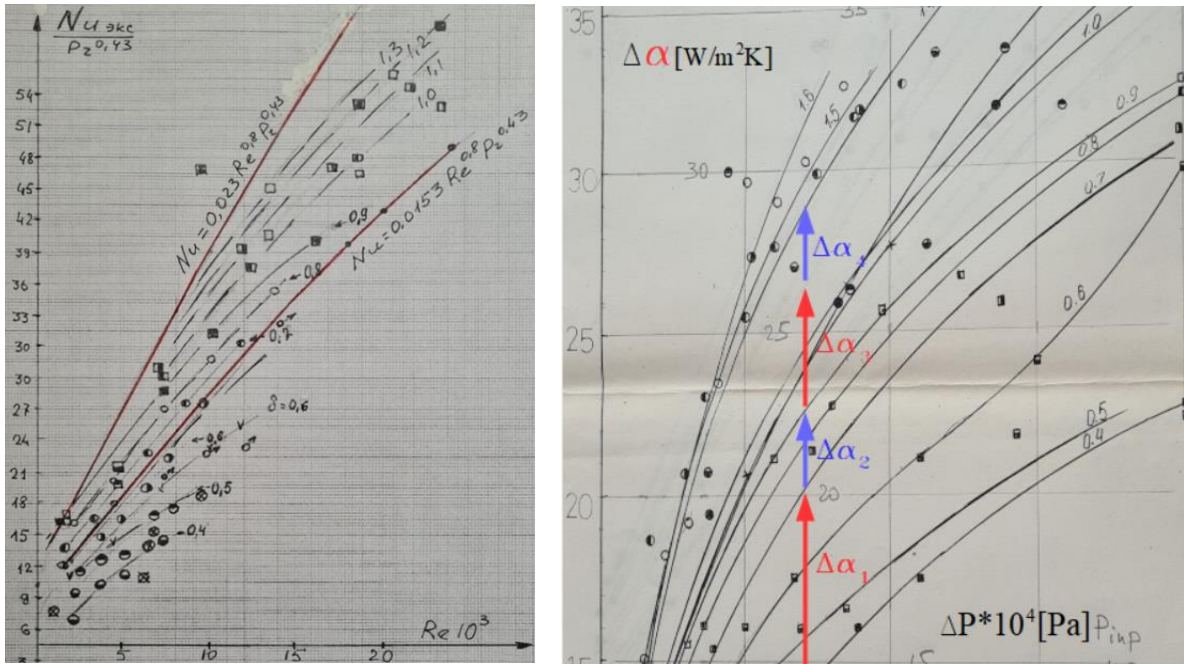


Рис. 4. Характеристики процесів перенесення тепла у щілинних каналах:
 а – залежність $Nu = f(Re)$ у каналах з висотою $h = 0,4-1,3$ мм; б – залежність $\alpha = f(P)$ у каналах з висотою $h = 0,4-1,6$ мм

Аналіз залежності $\alpha = f(P)$ у каналах з висотою $h = 0,4-1,6$ мм на рис. 4, б показує, що з експериментальних даних середніх значень коефіцієнтів тепловіддачі можна зробити висновок про те, що темп збільшення коефіцієнта тепловіддачі в діапазоні $h = 0,4-0,65$ мм і $h = 0,9-1,17$ мм (зони позитивних динамічних компонент) більше, ніж у діапазоні $h = (0,65-0,9)$ мм та $h = (1,17-1,45)$ мм (зони негативних динамічних компонент).

Зіставлення результатів гідравлічного та теплового експерименту показує ознаки впливу структури потоків (хвильовий та дискретний характер розподілу динамічних компонентів енергії в потоці рідини) на гідравлічні та теплові параметри потоків (рис. 5). Причому традиційно для розрахунків та подання характеристик використовують коефіцієнти опорів (коефіцієнт гідравлічного тертя – λ), а для теплових процесів використовують пряму пропорційність – коефіцієнти тепловіддачі α . Для газотрубних котлів отримані результати можна використовувати для розробки пристроїв інтенсифікації тепловіддачі на границі газ – металева стінка. Результати показують діапазон поперечних розмірів каналів, де коефіцієнт тепловіддачі має високі значення, при цьому опори каналів матимуть мінімальні значення.

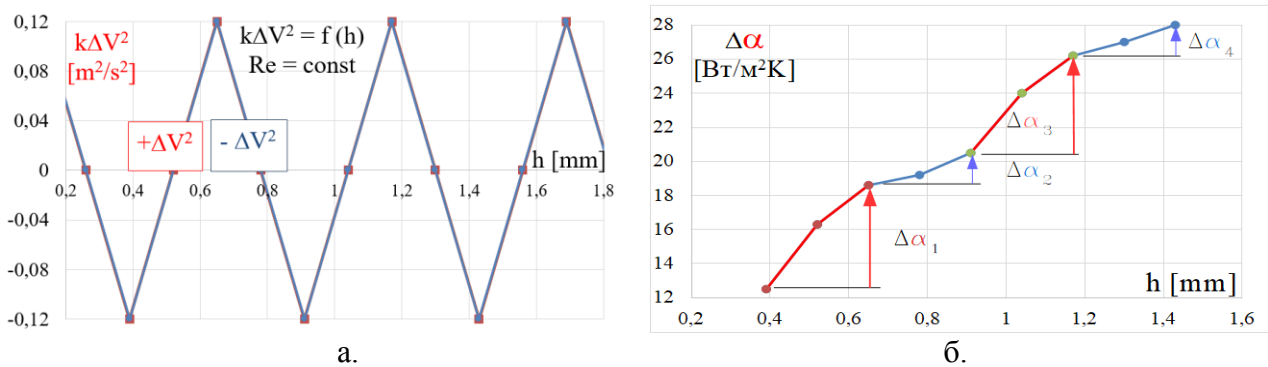


Рис. 5. Залежності зміни динамічної компоненти енергії потоку та коефіцієнтів тепловіддачі при зміні розмірів каналів:

а – $k\Delta V^2 = f(h)$ при $Re = 1700$; б – $\alpha = f(h)$ при $P = \text{const}$

Вплив поздовжньої структури потоків на коефіцієнт тепловіддачі. Важливе значення повинні мати нові знання організації поздовжніх структур потоків. Для виявлення структури потоків показано візуальну картину рідини, що витікає в затоплений простір (рис. 6).

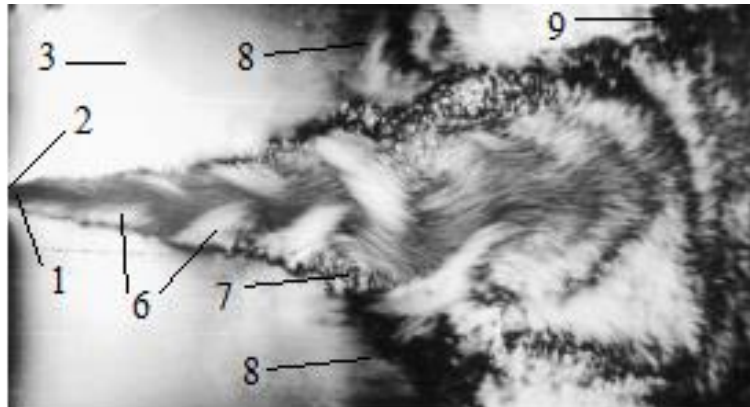


Рис. 6. Структура турбулентного струменя у затопленому просторі:
 1 – струмінь; 2 – канал; 3 – затоплений простір; 6 – дискретні структури; 7 – вихори;
 8 – границя зони утворення дискретних структур

Інтерес представляє зона утворення світлих дискретних областей, що характеризують збільшення динамічної складової енергії потоку, спрямованої від прикордонного шару всередину струменя. Сьогодні більше уваги приділяється вихорам – 7. Проте слід зазначити, що наявність вихорів показує різке збільшення опорів у потоці. Дискретні області – 6 важко виявляти у потоках, та їх роль важко переоцінити. Виготовлення турбулізаторів для котлів дозволяє суттєво збільшити тепловіддачу на границі газ – метал, при цьому забезпечити помірні значення гідравлічних опорів. На рис. 7 показаний турбулізатор для котла "Колві".

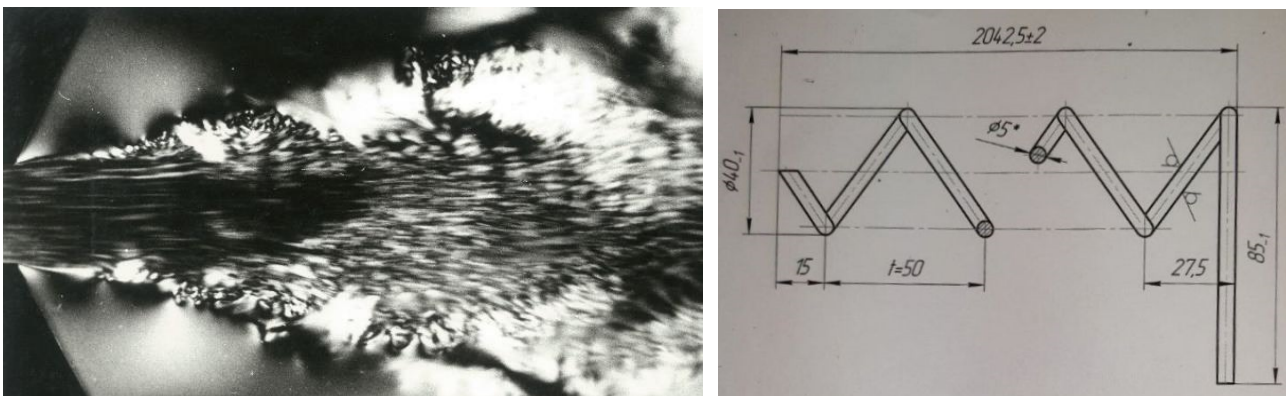


Рис. 7. Метод розробки геометрії турбулізатора котла на основі використання структури струменя в затопленому просторі

Випробування котла «Колві», в якому досліджувалися енергетичні параметри двох варіантів експлуатації: 1 – без турбулізаторів у газових трубах та 2 – із встановленням стрічки для інтенсифікації теплообміну. Установка турбулізатора дозволила збільшити ефективність котла від $\eta_{к,1} = 0,8$ до величини $\eta_{к,2} = 0,92$. При цьому витрати енергії на роботу вентилятора змінилися незначно.

Висновки. Аналіз результатів більше 430 досліджень зі збільшення коефіцієнтів тепловіддачі на границі газ – металева стінка показує можливість збільшення перенесення теплоти в 2-5 разів, проте всі пропозиції призводять до значного збільшення гідро- або аероопорів і відповідно суттєвому зростанню витрат енергії на транспорт.

Візуальні дослідження потоків з виявленням самоорганізації структури потоків дають корисну інформацію для організації гідравлічних та теплових експериментів для виявлення впливу структурної організації на основні параметри енергетичного обладнання.

Гідравлічні та теплові експерименти підтвердили вплив структурної організації рідин та газів на енергетичні показники потоків. Результати дозволяють усунути проблему невизначеності при розрахунках енергетичних параметрів [7].

Отримані результати демонструють переваги візуальної інформації про самоорганізацію структури потоків рідин та газів при розробці або вдосконаленні геометрії каналів з метою покращувати параметри роботи систем опалення, охолодження, кліматизації тощо.

Література

1. Wen-Tao Ji, Anthony M. Jacobi, Ya-Ling He, Wen-Quan Tao. Summary and evaluation on the heat transfer enhancement techniques of gas laminar and turbulent pipe flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. 111. P. 467-483.
2. Ji W.T., Jacobi A.M., He Y.L., & Tao W.Q. 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. P. 735-754.
3. Chang S.W., Yang T.L., & Liou J.S. Heat transfer and pressure drop in a tube with broken twisted tape insert. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007. 32(2). P. 489-501.
4. Chang S.W., Jan Y.J., & Liou J.S. Turbulent heat transfer and pressure drop in a tube fitted with serrated twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. 46(5). P. 506-518.
5. Bhuiya M., Chowdhury M., Saha M., & Islam M. 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, P. 49-57.
6. Fan J.F., Ding W.K., He J.F., Tao W.Q. A performance evaluation plot of enhanced heat transfer techniques oriented for energy-saving. *Heat Mass Transfer*. 2009. 52 (1). P. 33-44.
7. Хли-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. P. 1032-1044.
8. Dreytser G.A. Modern problems of heat transfer intensification in channels. *Engineering Physics Journal*. 2000. 74(4). P. 33-40.
9. Baron V.G. Shell-and-tube heat exchange apparatus at the end of the 20th century. *Non-Traditional and Renewable Energy Sources*. 2000. 2(5). P. 34-36.
10. Baron V.G. Thin-walled heat exchange apparatus: intensification and general analysis of the situation. *Energy Conservation*. 2002. 7. P. 20-22.
11. Arsirii V., Kravchenko O., Savchuk B., & Arsirii O. 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)*. 2021. Vol. 327, 05003.
12. Album of Fluid Motion by Milton Van Dyke. Stanford, California, 2012.
13. Album of Fluid Motion. In addition, Milton Van Dyke, 2023. URL: <https://www.2023apsdfd.org>.
14. Кожелупенко Ю.Д., Коба А.Л. Экспериментальные исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления при однофазном течении воды в щелевых каналах. *Холодильная техника и технология*. 2002. № 4 (78). С. 40-47.
15. Arsiri V., Kravchenko O., Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics. *International Journal Mechanics and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 22. No. 2. P. 405-414.

References

- [1] Wen-Tao Ji, Anthony M. Jacobi, Ya-Ling He, Wen-Quan Tao, "Summary and evaluation on the heat transfer enhancement techniques of gas laminar and turbulent pipe flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, pp. 467-483, 2017.
- [2] 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*, 88, pp. 735–754, 2015.
- [3] S. W. Chang, T. L. Yang, J. S. Liou, "Heat transfer and pressure drop in a tube with broken twisted tape insert", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), pp. 489–501, 2007.
- [4] S. W. Chang, Y. J. Jan, J. S. Liou, "Turbulent heat transfer and pressure drop in a tube fitted with serrated twisted tape", *International Journal of Thermal Sciences*, 46(5), pp. 506–518, 2007.
- [5] 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*, 46, pp. 49–57, 2013.
- [6] J.F. Fan, W.K. Ding, J.F. He, W.Q. Tao, "A performance evaluation plot of enhanced heat transfer techniques oriented for energy-saving", *Heat Mass Transfer*, 52 (1), pp. 33–44, 2009.
- [7] A. Khli-Nikulin, A.S. Moita, A.L.N. Moreira, S.M.S. Murshed, A. Huminic, Y. Grosu, A. Faik, J. Nieto-Maestre, O. Khliyeva, "Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient, and turbulent flow of isopropyl alcohol", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, pp. 1032–1044, 2019.
- [8] G.A. Dreytser, "Modern problems of heat transfer intensification in channels", *Engineering Physics Journal*, 74(4), pp. 33-40, 2000.
- [9] V.G. Baron, "Shell-and-tube heat exchange apparatus at the end of the 20th century", *Non-Traditional and Renewable Energy Sources*, 2(5), pp. 34-36, 2000.
- [10] V.G. Baron, "Thin-walled heat exchange apparatus: intensification and general analysis of the situation", *Energy Conservation*, 7, pp. 20-22, 2002.
- [11] V. Arsirii, O. Kravchenko, B. Savchuk, O. Arsirii, "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, 05003, 2021.
- [12] Album of Fluid Motion by Milton Van Dyke. Stanford, California, 2012.
- [13] Album of Fluid Motion. In addition, Milton Van Dyke, 2023. [Online]. Available: <https://www.2023apsdfd.org>. Accessed on: January 25, 2024.
- [14] Yu.D. Kozhelupenko, O.L. Koba, "Eksperymentalni doslidzhennia teploviddachi ta hidravlichnoho oporu pry odnofaznomu perebihu vody u shchilyunnykh kanalakh", *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*, no. 4 (78), pp. 40 – 47, 2002.
- [15] V. Arsiri, O. Kravchenko, "Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics", *International Journal Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 405-414, 2018.

THERMAL AND AEROMODELS OF ENERGY EQUIPMENT OF RESIDENTIAL COMPLEXES

¹**Arsirii V.A.**, Doctor of Sci., Professor,
vasyly.arsiriy@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3617-8487

¹**Kroshka O.V.**, graduate student,
Kolvi@epg.kolvi.com, ORCID: 0000-0003-0975-3079
¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrikson str., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. During accidents or destruction of the infrastructure of residential complexes at low temperatures, it is necessary to restore the operation of heat supply systems in a short time. It is convenient to use gas tube boilers for this. But we need new solutions to the problems of increasing the power and energy efficiency of equipment and systems due to the reduction of resistances to the movement of liquids or gases, as well as the intensification of heat transfer. Numerous studies have shown that an increase in the heat transfer coefficient at the gas-metal wall interface by 2-5 times leads to an increase in energy consumption of boiler fans by 10 times or more. The article uses three research methods to improve the performance of boilers. Visual diagnostics of the movement of liquids and gases made it possible to identify signs of self-organization of the flow structure. Hydraulic studies in slot channels, where only the height h varied in the range $h = 0.2-2.5$ mm, confirmed that the distribution structure of the pulsation components of the dynamic part of the energy affects the increase or decrease in speed at a given initial pressure.

The thermal experiment showed that the flow structure also affects the nature of the change in the heat transfer coefficient. For channel sizes where the pulsation components have positive values, the increase in the heat transfer coefficient is much more intense than for sizes where the pulsations have negative values. That is, visual studies of the flow structure and the correct choice of transverse channel sizes can solve the problem of increasing the flow up to 24% without additional energy costs, as well as eliminate the problem of uncertainty when solving the problem of intensifying heat transfer at the gas-metal wall boundary.

Visual studies of the jet in a flooded space provide information for solving the problem of intensifying heat transfer. The use of turbulators in gas-tube boilers ensured an increase in boiler efficiency from $\eta_{k.1} = 0.84$ to $\eta_{k.2} = 0.929$. At the same time, the energy consumption for fan operation changed slightly. The use of visual diagnostics of the flow structure makes it possible to solve hydraulic and thermal problems when developing or improving energy equipment for housing complexes.

Key words: residential complexes, boilers, power, energy efficiency, heat transfer, temperature, heat transfer coefficient, pressure, resistance, modeling, improvement.

Стаття надійшла до редакції 2.02.2024