

АНОТАЦІЯ

Крошка О.В. **Методи поліпшення показників теплотехнічного обладнання житлових комплексів.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2024.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, вибрано об'єкт досліджень, показано зв'язок роботи зі проблемами житлових комплексів у складні часи, що потребують швидкого відновлення енергетичної інфраструктури. Сформульовані мета роботи і завдання досліджень, описано методи досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

У *першому розділі* проаналізовано залежність енергетичного забезпечення житлових комплексів від природніх катаклізмів, а також військових руйнувань. Як показує досвід для швидкого відновлення тепlopостачання будинків за більшістю показників добре зарекомендували себе газотрубні котли, у трубах яких рухаються димові гази. Вони прості у виготовленні та експлуатації, але мають обмеження у збільшенні теплової потужності через технічні особливості. Головною перешкодою є низькі значення переносу теплоти на межі «димові гази – металева стінка». Аналіз відомих методів інтенсифікації переносу теплоти від газів свідчить про складнощі та протиріччя у вирішенні цієї проблеми. Дослідження останнього часу показують чотири варіанту рішень, що ведуть до збільшення коефіцієнту тепловіддачі α за рахунок зміни геометрії проточних частин. При реальному проектуванні виникають складнощі прогнозування реальних значень збільшення коефіцієнту тепловіддачі α , тому що зазвичай вказують широкий діапазон розбіжностей: у 2 – 6 разів зі складними розрахунками рекомендацій. Вже доведено, що використання простих турбулізаторів – вставок и, в першу чергу, спіралей дає результати інтенсифікації теплообміну

до збільшення у 6 разів, які співставні зі складними та витратними методами. Використання спіралей спрощує проектування та здешевлює обладнання. Але треба відзначити суттєве протиріччя – встановлення спіралей у газові труби інколи призводить до збільшення коефіцієнтів аероопорів (R ; λ) руху газів у 10 разів, а іноді більш ніж у 100 разів, що приводить до значного підвищення витрат енергії на роботу вентиляторів котлів. Треба підкреслити важливий факт, що причиною такого непропорційного збільшення витрат електрики вентиляторами може бути проблема невизначеності розрахунків аеросистем з похибками до 25% при виконанні проектних досліджень. Проблеми невизначеності проектних розрахунків виникають у різних аспектах проектування. Їх треба враховувати також для вибору поперечних розмірів ізоляції. Тому розв'язання цих протиріч є актуальною науково-технічною задачею покращення показників енергетичного обладнання у системах теплопостачання житлових комплексів.

У роботі сформульовано *робочу гіпотезу*. Існують і можуть бути реалізовані прості заходи збільшення тепловіддачі на межі «димові гази – металева стінка» з одночасним зменшенням аероопор руху димових газів у елементах котлів задля забезпечення ефективних енергетичних балансів. Основою для ефективного вибору цих заходів вибрано методи удосконалення геометричних параметрів проточних частин за допомогою візуалізації процесів самоорганізації структури потоків та покращення і уточнення розрахунків основних енергетичних параметрів роботи обладнання.

Виходячи з робочої гіпотези та спираючись на аналіз літератури, була сформульована **мета роботи**: розробка заходів для підвищення ефективності енергетичного обладнання житлових комплексів за рахунок удосконалення геометрії проточних частин на основі моделей співставних коефіцієнтів пропорційності процесів переносу теплоти і руху рідини або газу.

Для досягнення мети роботи виявилось необхідним виконати наступні **завдання**: дослідити вплив геометричних параметрів обладнання на зміни енергетичних показників енергетичних процесів на прикладі газотрубних котлів, розробити і запропонувати шляхи інтенсифікації переносу тепла та зменшення втрат енергії у проточних частинах аеросистем за рахунок їх модифікації.

У *другому розділі* розроблено дві графоаналітичні моделі енергетичних процесів у вигляді представлення основних параметрів енергії: динамічної складової D та потенціалу P , а також коефіцієнтів пропорційності (бажано значень опорів). Перша «термомодель» процесів переносу теплоти скрізь металеву стінку з використанням коефіцієнтів переносу тепла має графічний характер і відображає пряму залежність основних параметрів динамічної складової теплової енергії D (кількості тепла q) та термopотенціалів (температури t). Ця модель удосконалена за рахунок додаткового графіку на основі термічних опорів R_t .

Друга «аеромодель», подібна термомоделі, описує процес руху рідини або газів. Вона розроблена для співставлення теплових і аеропроеесів. Аеромодель представляє основні енергетичні параметри руху газів у вигляді динамічної складової аероенергії $D = kV^2$ та аеропотенціалів (тиску P) на основі використання коефіцієнтів опорів R_a у аеросистем. Саме коефіцієнти опорів: як теплові R_t , так і аеро R_a , дозволяють розраховувати або графічно виявляти основні енергетичні параметри як теплових процесів, так і процесів руху газів у проточних частинах обладнання.

На основі графоаналітичної «термомоделі» розроблено метод графічного визначення зміни кількості теплової енергії при зміні коефіцієнтів пропорційності – тепловіддачі (як одиниць кількості тепла на одиницю температури або потенціалу та одиницю розміру), а також термічних опорів, що дозволило визначити розподіл температур у різних точках переносу теплоти.

На основі графоаналітичної «аеромоделі» розроблено метод розрахунку та представлення зміни кількості динамічної складової гідро- або аероенергії при зміні опорів (як міри втрат динамічної енергії руху), що дозволило визначити розподіл значень тиску в різних точках газового тракту котла.

Таким чином, дві графічні моделі процесів переносу теплоти і руху газів дають два наявних метода моделювання зміни та аналізу співвідношення основних енергетичних параметрів на основі співставних коефіцієнтів пропорційності – коефіцієнтів опорів як теплових, так і аеропроектів.

У *третьому розділі* розроблено метод удосконалення проточних частин елементів гідро та аеродинамічних систем з використанням комп'ютерних методів обробки візуальних картин структури потоків. Для цього були вокинані чотири етапи: візуалізація потоків у фізичної моделі; оцифрування візуальних картин для отримання кількісної та якісної оцінок стану газових потоків в елементах; синтез нової проточної частини елементів гідро- та аеродинамічних систем; розробка проточної частини зі зниженим опором на основі комп'ютерного моделювання. Реалізація запропонованого методу показана на прикладі вдосконалення «повороту» потоку газів, де створено умови самоорганізації структури середовища. Виділення окремих ділянок потоку, кількісна та якісна оцінка стану структури потоку та синтез з метою оптимізації геометрії проточної частини, дозволило розробити геометрію каналу без відривів потоку від стінок, що забезпечує зменшення аероопору «повороту потоку на 180°» у 2,6 рази.

У *четвертому розділі* досліджено вплив поперечної структури потоків на основні енергетичні параметри та коефіцієнти пропорційності, що дозволило за рахунок зміни поперечних розмірів каналів збільшити перенос теплоти без збільшення витрат на процеси руху газів.

По-перше, на відміну від експериментів Рейнольдса було візуально виявлено не тільки шари ламінарного потоку, но також розміри шарів: дві

смуги (світла і сіра) мають сталий розмір $\Delta h = 0,52$ мм. Світлі смуги запропоновано характеризувати як позитивні пульсаційні компоненти динамічної складової енергії; сірі смуги – як негативні компоненти динамічної складової енергії.

В роботі представлений аналіз результатів двох серій експериментів, які виконано у двох різних лабораторіях. Були досліджені залежності коефіцієнта гідравлічного тертя λ від числа Рейнольдса $\lambda = f(Re)$ при дискретній зміні дійсних значень висоти каналу h у діапазоні $h = (0,4 \div 2,5)$ мм. Вимірювались витрати Q газів або швидкість V в заданому діапазоні тисків ($P = 5 - 40$ кПа). Шорсткість поверхні каналів під час проведення експериментів була нульовою і не змінювалася. Тому для ламінарного режиму результати гідравлічного експерименту залежності коефіцієнта тертя від числа Рейнольдса було необхідно порівнювати з лінією за формулою Пуазейля $\lambda = 64/Re$; при числах $Re > 5000$ результати порівнювались з лінією, яка розрахована за формулою Блазіуса $\lambda = 0,3164/ Re^{0,25}$.

У першій серії експериментів, де в основі була відома теорія тепло- та масообміну з використанням осереднення параметрів, значення реальних даних мають невизначенність 25% і більше у залежності $\lambda = f(Re)$ відносно до формул Пуазейля та Блазіуса. Другий гідравлічний експеримент, якій планувалася з прив'язкою до результатів виявленої структури потоків, визначив залежність не тільки від числа Рейнольдса, а також нелінійну залежність коефіцієнта гідравлічного тертя λ від зміни висоти каналів h у вигляді $\lambda = f(Re; h)$. Лінійна зміна розмірів висоти каналів h дає нелінійну зміну значень витрати Q газів або швидкості V . Таким чином, на основі результатів гідравлічних експериментів запропоновано вважати, що зміну динамічної складової енергії потоку $D = kV^2 = f(P)$, а також коефіцієнтів гідравлічного тертя λ відображає розподіл щільності світлих і сірих смуг візуальних картин, що підтверджує сталий розподіл енергетичної структури потоків, яка має нелінійних характер розподілу реальних значень епюри

швидкостей у поперечному перерізі каналів. Це дозволяє усунути проблему невизначеності розрахунків параметрів у каналах щілинних розмірів.

По-друге, досліджено (у першій серії експериментів) вплив поперечної структури потоків на коефіцієнт тепловіддачі α . Аналіз залежності $\alpha = f(P)$ у каналах з висотою $h = 0,4 \div 1,6$ мм довів, що темп збільшення коефіцієнта тепловіддачі в діапазоні розміру каналів $h = 0,4 \div 0,65$ мм і $h = 0,9 \div 1,17$ мм (світлі зони позитивних динамічних компонент енергії) більше, ніж у діапазоні лінійної зміни висоти $h = (0,65 \div 0,9)$ мм і $h = (1,17 \div 1,45)$ мм (сірі зони негативних динамічних компонент енергії).

Зіставлення результатів гідравлічного та теплового експерименту показує ознаки впливу структури потоків (нелінійний характер розподілу динамічних компонентів енергії) на гідравлічні та теплові параметри потоків. Слід відмітити, що традиційно для розрахунків та подання характеристик використовують коефіцієнти опорів (коефіцієнт гідравлічного тертя – λ), а для теплових процесів використовують пряму пропорційність – коефіцієнти тепловіддачі α . Отримані результати можна використовувати для розробки пристроїв інтенсифікації тепловіддачі на межі «газ – металева стінка». Результати показують діапазон поперечних розмірів каналів, де коефіцієнт тепловіддачі має високі значення, при цьому аероопори каналів матимуть мінімальні значення.

У н'ятому розділі досліджено вплив подовжньої структури потоків на показники переносу теплоти за рахунок збільшення коефіцієнту тепловіддачі на межі «газ – металева стінка». Візуальні дослідження надають варіанти змін подовжніх розмірів елементів турбулізаторів, які забезпечують підвищення ефективності котлів без збільшення витрат на роботу вентиляторів.

Сьогодні велика увага приділяється вихорам. Проте слід зазначити, що наявність вихорів показує різке збільшення аероопорів у потоці. Аналіз структури потоків струменя, що витікає в затоплений простір, дозволяє виявляти зони подовжніх структур у вигляді світлих дискретних областей,

які характеризують локальне збільшення динамічної складової теплової енергії потоку. Виявлені світлі подовжні ділянки вказують оптимальні подовжні розміри спіралей турбулізаторів. Виготовлення турбулізаторів для котлів дозволяє суттєво збільшити тепловіддачу на межі «газ – метал» і при цьому забезпечити помірні значення гідравлічних опорів. Наведено дані випробувань котла, 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.

Таким чином, візуальні дослідження потоків з виявленням самоорганізації структури потоків дають нову корисну інформацію для організації гідравлічних та теплових експериментів для виявлення впливу структурної організації потоків у проточних частинах обладнання на основні енергетичні параметри та коефіцієнти пропорційності у вигляді опорів.

Результати дозволяють усунути проблему невизначеності при розрахунках енергетичних параметрів переносу теплоти, а також руху рідини або газів. Отримані результати демонструють переваги візуальної інформації при розробці або вдосконаленні геометрії каналів з метою покращення параметрів роботи систем опалення, кліматизації, вибору розмірів ізоляційних матеріалів тощо для поліпшення енергетичних показників систем житлових комплексів.

Ключові слова: житлові комплекси, котли газотрубні, ефективність, гідро- та аероопори, перенос теплоти, тепловіддача, фізичне моделювання, візуалізація, структура потоків, самоорганізація.

ABSTRACT

Kroshka O.V. **Methods of improving the indicators of heating equipment of residential complexes.** – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 - Construction and civil engineering. – Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa, 2024.

The introduction substantiates the relevance of the topic, selects the object of research, shows the connection of the work with the problems of residential complexes in difficult times, which require a quick restoration of the energy infrastructure. The purpose of the work and research tasks are formulated, the research methods are described, the provisions of scientific novelty and the practical significance of the obtained results are given.

The first chapter analyzes the dependence of the energy supply of residential complexes on natural disasters, as well as military destruction. As experience shows, gas tube boilers, in the pipes of which flue gases move, have proven themselves well for the rapid restoration of heat supply to buildings according to most indicators. They are easy to manufacture and operate, but have limitations in increasing thermal power due to technical features. The main obstacle is the low values of heat transfer at the "flue gases - metal wall" boundary. Analysis of known methods of intensification of heat transfer from gases shows the difficulties and contradictions in solving this problem. Recent studies show four options for solutions leading to an increase in the heat transfer coefficient α by changing the geometry of the flow parts. During actual design, there are difficulties in predicting the actual values of the increase in the heat transfer coefficient α , because they usually indicate a wide range of discrepancies: 2 to 6 times with complex calculations of recommendations. It has already been proven that the use of simple turbulators - inserts and, first of all, spirals gives the results of intensification of heat exchange up to 6 times, which are comparable to complex and expensive methods. The use of spirals simplifies the design and makes the equipment cheaper. But it is necessary to note a significant contradiction - the

installation of spirals in gas pipes sometimes leads to an increase in the air resistance coefficients (R ; λ) of the movement of gases by 10 times, and sometimes by more than 100 times, which leads to a significant increase in energy consumption for the operation of boiler fans. It is necessary to emphasize the important fact that the reason for such a disproportionate increase in electricity consumption by fans can be the problem of uncertainty in calculations of aerosystems with errors of up to 25% when performing design studies. Problems of uncertainty of design calculations arise in various aspects of design. They should also be attributed to the selection of the geometry of thermal insulation and equipment channels for providing comfortable living conditions. Therefore, solving these contradictions is an urgent scientific and technical task of improving the energy performance of energy equipment in the heat supply systems of residential complexes.

The work formulates a working hypothesis. There are and can be implemented simple measures to increase the heat transfer at the boundary "flue gases - metal wall" with the simultaneous reduction of air resistances for the movement of flue gases in boiler elements in order to ensure effective energy balances. The basis for the effective selection of these measures is the methods of improving the geometric parameters of the flow parts by means of visualization of the processes of self-organization of the flow structure and improvement and refinement of the calculations of the main energy parameters of the equipment.

Based on the working hypothesis and based on the analysis of the literature, the goal of the work was formulated: the development of measures to increase the efficiency of the energy equipment of residential complexes due to the improvement of the geometry of the flow parts based on the models of the relative coefficients of proportionality of the processes of heat transfer and movement of liquid or gas.

To achieve the goal of the work, it turned out to be necessary to perform the following tasks: to investigate the influence of the geometric parameters of the equipment on changes in energy indicators of energy processes using the example

of gas tube boilers, to develop and propose ways of intensifying heat transfer and reducing energy losses in the flow parts of aerosystems due to their modification.

In **the second chapter**, two grapho-analytical models of energy processes are developed in the form of a representation of the main parameters of energy: the dynamic component D and the potential P , as well as proportionality coefficients (preferably resistance values). The first "thermomodel" of heat transfer processes throughout the metal wall using heat transfer coefficients is graphical in nature and reflects the direct dependence of the main parameters of the dynamic component of thermal energy D (amount of heat q) and thermal potentials (temperature t). This model is improved with an additional graph based on thermal resistances R_t .

The second "aeromodel", similar to the thermal model, describes the process of movement of liquids or gases. It is designed to compare thermal and air processes. Aeromodel represents the main energy parameters of gas movement in the form of a dynamic component of air energy $\mathcal{A} = kV^2$ and air potentials (pressure P) based on the use of resistance coefficients R_a in aero systems. It is the resistance coefficients: both thermal R_t and aero R_a , that allow you to calculate or graphically identify the main energy parameters of both thermal and gas movement processes in the flow parts of the equipment.

On the basis of the grapho-analytical "thermomodel", a method of graphically determining the change in the amount of thermal energy with a change in proportionality coefficients - heat transfer (as units of the amount of heat per unit of temperature or potential and unit of size), as well as thermal resistances, was developed, which made it possible to determine the distribution of temperatures at different points of heat transfer .

On the basis of the grapho-analytical "aeromodel" a method was developed for calculating and presenting the change in the amount of the dynamic component of hydro- or aero-energy when the resistances change (as a measure of the loss of dynamic energy of movement), which made it possible to determine the distribution of pressure values at different points of the gas path of the boiler.

Thus, two graphical models of heat transfer processes and gas movement provide two existing methods of modeling changes and analysis of the ratio of the main energy parameters based on comparable proportionality coefficients - resistance coefficients of both thermal and aero processes.

In **the third chapter**, a method of improving the flow parts of the elements of hydro and aerodynamic systems using computer methods for processing visual pictures of the flow structure is developed. For this, four stages were created: visualization of flows in the physical model; digitization of visual pictures to obtain quantitative and qualitative assessments of the state of gas flows in the elements; synthesis of a new flow part of hydraulic and aerodynamic system elements; development of a flow part with reduced resistance based on computer simulation. The implementation of the proposed method is shown on the example of improving the "turn" of the gas flow, where the conditions for self-organization of the environment structure are created. Isolation of individual sections of the flow, quantitative and qualitative assessment of the state of the flow structure and synthesis with the aim of optimizing the geometry of the flow part, made it possible to develop a channel geometry without flow separation from the walls, which provides a 2.6-fold reduction in the air resistance of the "*180° turn of the flow*".

In **the fourth chapter**, the influence of the transverse structure of the flows on the main energy parameters and proportionality coefficients was investigated, which made it possible to increase heat transfer without increasing the costs of gas movement processes due to the change in the transverse dimensions of the channels.

First, unlike the Reynolds experiments, not only laminar flow layers were visually detected, but also the dimensions of the layers: two bands (light and gray) have a constant size of $\Delta h = 0.52$ mm. Light bands are proposed to be characterized as positive pulsating components of the dynamic energy component; gray bars are negative components of the dynamic energy component.

The paper presents an analysis of the results of two series of experiments performed in two different laboratories. The dependences of the hydraulic friction coefficient λ on the Reynolds number $\lambda = f(Re)$ were investigated with a discrete change in the actual values of the channel height h in the range $h = (0.4 \div 2.5)$ mm. Gas flows Q or velocity V were measured in a given pressure range ($P = 5 - 40$ kPa). The surface roughness of the channels during the experiments was zero and did not change. Therefore, for the laminar regime, it was necessary to compare the results of the hydraulic experiment on the dependence of the friction coefficient on the Reynolds number with the line according to Poiseuille's formula $\lambda = 64/Re$; at numbers $Re > 5000$, the results were compared with the line calculated by the Blasius formula $\lambda = 0,3164/ Re^{0,25}$.

In the first series of experiments, where the theory of heat and mass transfer was based on the use of parameter mediation, the values of real data have an uncertainty of 25% or more in the dependence $\lambda = f(Re)$ relative to the formulas of Poiseuille and Blasius. The second hydraulic experiment, which was planned based on the results of the revealed flow structure, determined the dependence not only on the Reynolds number, but also the nonlinear dependence of the coefficient of hydraulic friction λ on the change in the height of the channels h in the form $\lambda = f(Re; h)$. A linear change in the dimensions of the height of the channels h gives a non-linear change in the values of gas flow rate Q or velocity V . Thus, based on the results of hydraulic experiments, it is proposed to assume that the change in the dynamic energy component of the flow $D = kV^2 = f(P)$, as well as the coefficients of hydraulic friction λ reflects the distribution of the density of light and gray bands of visual pictures, which confirms the constant distribution of the energy structure of the flows, which has a non-linear nature of the distribution of the real values of the velocity plot in the cross section of the channels. This makes it possible to eliminate the problem of the uncertainty of parameter calculations in channels with slot sizes.

Secondly, the influence of the transverse structure of the flows on the heat

transfer coefficient α was investigated (in the first series of experiments). Analysis of the dependence of $\alpha = f(P)$ in channels with a height of $h = 0.4 \div 1.6$ mm proved that the rate of increase in the heat transfer coefficient in the range of channel sizes $h = 0.4 \div 0.65$ mm and $h = 0.9 \div 1.17$ mm (light zones of positive dynamic energy components) more than in the range of linear height change $h = (0.65 \div 0.9)$ mm and $h = (1.17 \div 1.45)$ mm (gray zones of negative dynamic energy component).

A comparison of the results of the hydraulic and thermal experiments shows signs of the influence of the flow structure (non-linear nature of the distribution of dynamic energy components) on the hydraulic and thermal parameters of the flows. It should be noted that traditionally resistance coefficients (hydraulic friction coefficient - λ) are used for calculations and characteristics, and direct proportionality - heat transfer coefficients α are used for thermal processes. The obtained results can be used for the development of heat transfer intensification devices at the "gas - metal wall" interface. The results show a range of cross-sectional dimensions of the channels, where the heat transfer coefficient has high values, while the aerofoils of the channels will have minimum values.

In the fifth chapter, the influence of the longitudinal structure of the flows on the heat transfer indicators due to the increase of the heat transfer coefficient at the "gas - metal wall" interface is investigated. Visual studies provide options for changes in the longitudinal dimensions of the turbulator elements, which ensure an increase in boiler efficiency without increasing fan operation costs.

Today, much attention is paid to vortices. However, it should be noted that the presence of vortices shows a sharp increase in drag in the flow. The analysis of the flow structure of the jet flowing into the flooded space allows us to identify zones of longitudinal structures in the form of bright discrete areas that characterize a local increase in the dynamic component of the thermal energy of the flow. The identified light longitudinal sections indicate the optimal longitudinal dimensions of the spirals of the turbulators. The production of turbulizers for boilers allows you to significantly increase the heat transfer at the "gas - metal"

interface and at the same time ensure moderate values of hydraulic resistances. The boiler test data are given, in which the energy parameters of two operating options were investigated: 1 – without turbulators in the gas pipes and 2 – with the installation of a belt for heat exchange intensification. The installation of the turbulator made it possible to increase the efficiency of the boiler from $\eta_{\kappa,1} = 0.8$ to $\eta_{\kappa,2} = 0.92$. At the same time, the energy consumption of the fan has changed slightly.

Thus, visual studies of flows with the detection of self-organization of the flow structure provide new useful information for the organization of hydraulic and thermal experiments to identify the influence of the structural organization of flows in the flowing parts of the equipment on the main energy parameters and proportionality coefficients in the form of resistances.

The results make it possible to eliminate the problem of uncertainty when calculating the energy parameters of heat transfer, as well as the movement of liquids or gases. The obtained results demonstrate the advantages of visual information in the development or improvement of channel geometry in order to improve the operating parameters of heating and air conditioning systems, the selection of sizes of insulating materials, etc. to improve the energy performance of residential complex systems.

Key words: residential complexes, gas-tube boilers, efficiency, hydraulic and air supports, heat transfer, heat transfer, physical modeling, visualization, flow structure, self-organization.