

**Теплообмін і аеродинаміка складнопрофільованих теплообмінних поверхонь.
Теплообмен и аэродинамика сложнопрофилированных теплообменных
поверхностей.**

Heat transfer and aerodynamics of complicated profiled heat transfer surfaces.

1. Номер державної реєстрації : № 0112U000936 , НТУУ «КПІ» - 2513-ф.

2. Науковий керівник: ТУЗ Валерій Омелянович, доктор технічних наук, професор кафедри АЕС і ІТФ.

Научный руководитель: ТУЗ Валерий Емельянович, доктор технических наук, профессор кафедры АЭС и ИТФ.

Scientific advisor: Tyuz V. E., doctor of technical science, professor of NPP and ETP chair.

3. Суть розробки, основні результати:

(укр.)

В рекуперативних трубчастих теплообмінних апаратах типу „газ-газ”, „газ-рідина” в основному використовуються поверхні нагріву з круглих труб. Однак, круглі труби, як елемент теплообмінної поверхні, з точки зору поліпшення їх теплоаеродинамічних характеристик на сьогоднішній день себе вичерпали. В даний час, технічно і економічно найбільш доступним і обґрунтованим шляхом зменшення маси та підвищення енергоефективності і ресурсозбереження теплообмінного обладнання, є застосування в теплообмінних апаратах поверхонь, які мають високу теплоаеродинамічну ефективність, невисоку вартість і простоту виготовлення. Таким вимогам відповідають складнопрофільовані труби плоскоовальної форми, які мають ряд суттєвих переваг перед трубами круглого профілю і насамперед володіють у 2-3 рази меншим аеродинамічним опором при практично однаковій інтенсивності теплообміну. Слід також відмітити, що дослідження впливу на теплоаеродинамічні характеристики геометричних параметрів масивів труб плоскоовальної форми в широкому діапазоні їх змін при поперечному обтіканні потоком в Україні і світі зовсім не проводились.

В межах виконаної науково-дослідної роботи виготовлені експериментальні макети плоскоовальних труб в діапазоні відносного подовження профілю $d_2/d_1=2-5$.

Дослідження конвективного теплообміну та аеродинамічного опору в поодиноких складнопрофільованих трубах та їх масивах проведені при широкому варіюванні їх геометричних характеристик та швидкостей потоку. Визначено вплив на теплообмін та опір геометричних характеристик поверхонь та режимних факторів. На базі проведених досліджень запропоновані нові узагальнюючі залежності для розрахунку конвективного теплообміну та аеродинамічного опору поверхонь зі складнопрофільованих плоскоовальних труб, які враховують вплив на інтенсивність теплообміну і опір геометричних характеристик труб, кроків між ними та режимних факторів в широкому діапазоні їх змін.

Досліджена структура течії у вигляді ліній току на поверхні плоскоовальної труби. Результати з візуалізації течії показали, що в області сполучення півкола та прямих ділянок плоскоовальної труби простежуються дві області відриву потоку з утворенням на її поверхні замкнених вихрів, а на поверхні труби круглої форми зафіксовано лише одна відривна область, яка в подальшому поступово трансформується у вихровий кормовий слід.

За результатами експериментальних досліджень вперше отримані інженерні методики теплового та аеродинамічного розрахунків поверхонь зі складнопрофільованих плоскоовальних труб, які дозволяють розробляти нові типи рекуперативних трубчастих теплообмінників на новій елементній базі у широких межах геометричних параметрів труб та їх масивів з відносним подовженням профілю труби від 2 до 5, відносним

поперечним та поздовжнім кроками між трубами, відповідно від 2 до 3,5 та від 2 до 5,5 в діапазоні змін швидкості потоку від 2 м/с до 30 м/с.

Результати теплоаеродинамічних розрахунків показали, що у повітрянагрівача, виконаного з плоскоовальних труб, масогабаритні характеристики на (20-30%) менші ніж у повітрянагрівача, виконаного з труб традиційної круглої форми при однаковій тепловій потужності апаратів.

(рос.)

Суть разработки, основные результаты:

В рекуперативных трубчатых теплообменных аппаратах типа "газ-газ", "газ-жидкость" в основном используются поверхности нагрева из круглых труб. Однако, круглые трубы, как элемент теплообменной поверхности, с точки зрения улучшения их теплоаэродинамических характеристик на сегодняшний день себя исчерпали. В настоящее время, технически и экономически наиболее доступным и обоснованным путем уменьшения массы и повышения энергоэффективности и ресурсосбережения теплообменного оборудования, является применение в теплообменных аппаратах поверхностей, которые имеют высокую теплоаэродинамическую эффективность, невысокую стоимость и простоту изготовления. Таким требованиям отвечают сложнопрофилированные трубы плоскоовальной формы, имеющие ряд существенных преимуществ перед трубами круглого профиля и прежде всего меньшим в 2-3 раза аэродинамическим сопротивлением при практически одинаковой интенсивности теплообмена. Следует также отметить, что исследования влияния на теплоаэродинамические характеристики геометрических параметров массивов труб плоскоовальной формы в широком диапазоне их изменения при поперечном обтекании потоком в Украине и мире вовсе не проводились.

В рамках выполненной научно-исследовательской работы изготовлены экспериментальные макеты плоскоовальных труб в диапазоне относительного удлинения профиля $d_2/d_1 = 2-5$.

Исследования конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления одиночных сложнопрофилированных труб и их массивов проведены при широком варьировании их геометрических характеристик и скоростей потока. Установлено влияние на теплообмен и сопротивление геометрических характеристик поверхностей и режимных факторов. На базе проведенных исследований предложены новые обобщающие зависимости для расчета конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления поверхностей из сложнопрофилированных плоскоовальных труб, учитывающих влияние на интенсивность теплообмена и сопротивление геометрических характеристик труб, шагов между ними и режимных факторов в широком диапазоне их изменения.

Исследована структура течения в виде линий тока на поверхности плоскоовальной трубы. Результаты по визуализации течения показали, что в области сопряжения полукруга и прямых участков плоскоовальной трубы прослеживаются две области отрыва потока с образованием на поверхности замкнутых вихрей, а на поверхности трубы круглой формы зафиксировано лишь одна отрывная область, которая в дальнейшем постепенно трансформируется в вихревой кормовой след.

По результатам экспериментальных исследований впервые получены инженерные методики теплового и аэродинамического расчетов поверхностей из сложнопрофилированных плоскоовальных труб, которые позволяют разрабатывать новые типы рекуперативных трубчатых теплообменников на новой элементной базе в широком диапазоне варьирования геометрических параметров труб и их массивов с относительным удлинением профиля трубы от 2 до 5, относительным поперечным и продольным шагами между трубами, соответственно от 2 до 3,5 и от 2 до 5,5 в диапазоне изменения скорости потока от 2 м/с до 30 м/с.

Результаты теплоаэродинамических расчетов показали, что у воздухоподогревателя, выполненного из плоскоовальных труб, массогабаритные характеристики на (20-30%) меньше чем у воздухоподогревателя, выполненного из труб традиционной круглой формы при одинаковой тепловой мощности аппаратов.

(англ.)

The essence of development, the main results:

In tubular recuperative heat exchangers such as "gas-gas", "gas-liquid" are mainly used heat transfer of circular tubes. However, circular tubes, as part of the heat transfer surface, in terms of improving their heat and aerodynamic performances to date have exhausted themselves. Now, technically and economically the most accessible and reasonable by reducing weight and improving energy efficiency and resource saving heat exchange equipment is application in heat exchangers surfaces that have high heat and aerodynamic efficiency, low cost and ease of production. Such requirements are met complicated profiled tubes of flat-oval form that have some significant advantages over tubes of circular profile and above all have a 2-3 times lower aerodynamic drag at practically the same intensity of heat transfer. It should also be noted that the study of the effect on the heat and aerodynamic properties of geometric parameters arrays tubes of flat-oval form in a wide range of change in the cross-flow in Ukraine and in the world does not hold.

Within the performed research work was produced the experimental models of flat-oval tubes ranging relative elongation profile $d_2/d_1=2-5$.

The study of convective heat transfer and aerodynamic drag in single complicated profiled tubes and their arrays carried out in wide variation of their geometrical characteristics and of the flow velocities. The influence on the heat transfer and drag surface geometrical characteristics and operational factors was determined. On the basis of the research proposed new generalized dependencies for calculation convective heat transfer and aerodynamic drag surfaces with complicated profiled flat-oval tubes that take into account the impact on the intensity of heat transfer and drag the geometrical characteristics of tubes, steps between them and operational factors in a wide range of its change.

The structure of the flow in the form of flow lines on the surface of flat-oval tube was investigated. The results of flow visualization showed that in combination of semicircle and straight sections of flat-oval tube reveal two field flow separation to form on the surface of the closed vortex and the surface of the tube round shape observed only one region tear, which later gradually transformed into a vortex feeding should.

According to experimental results obtained for the first time the engineering methods of thermal and aerodynamic calculations surfaces with complicated profiled flat-oval tubes that allow you to develop new types of tubular recuperative heat exchangers on new hardware components in a wide range of geometrical parameters of tubes and their ranges of elongation profile tube 2 to 5, the relative transverse and longitudinal steps of tubes, respectively, from 2 to 3.5 and 2 to 5.5 in the range of changing flow velocity from 2 m/s to 30 m/s.

The results of heat and aerodynamic calculations showed that the air heaters, made of flat-oval tubes dimensions and weight specifications for (20-30%) lower than the air heater, made of tubes traditional circular shape with the same thermal power units.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності:

- патенти

1. Патент на корисну модель №87032. Теплообмінна труба / Письменний Є.М., Руденко О.І., Терех О.М., Ніщик О.П., Семеняко О.В., Кондратюк В.А. 27.01.2014. Бюл. №2.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Попередній аналіз світових наукових і технологічних досягнень показав суттєву недостатність фундаментальних досліджень щодо розкриття механізмів і явищ, які впливають на процеси теплообміну у теплообмінних поверхнях зі складнопрофільованих плоскоовальних труб. Дослідження впливу на теплоаеродинамічні характеристики геометричних параметрів масиву складнопрофільованих труб плоскоовальної форми в широкому діапазоні їх змін при поперечному обтіканні потоком в Україні і світі зовсім не проводились. До теперішнього часу немає взагалі розрахункових співвідношень для обчислення значень коефіцієнтів аеродинамічного опору і тепловіддачі для пакетів з таких труб, а також даних для вибору оптимальних геометричних параметрів масивів труб складнопрофільованої форми, що практично стримує їх подальше впровадження у енергетичній галузі. Проведені деякі дослідження тепловіддачі та аеродинамічного опору, зазвичай в обмеженій кількості виконані на поодиноких трубах еліптичної форми та їх пакетах і направлені тільки на з'ясування питання впливу профілю на їх теплоаеродинамічні характеристики.

6. Економічна привабливість розробки для просування на ринок, впровадження та реалізації, показники, вартість.

Порівняння характеристик теплообмінних поверхонь повітрянагрівача з круглих та складнопрофільованих плоскоовальних труб показало збільшення коефіцієнта теплопередавання в 1,3-1,8 разів поверхонь плоскоовального профілю, що призводить до істотного зменшення загальної довжини труб та маси пристрою на 20-30%, зменшення гибів труб та отворів в колекторах або в трубчастих дошках. Сумарні втрати тиску по газовому та повітряному трактах, як наслідок зменшення загальної довжини труб та зміни профілю труб на плоскоовальний знижуються в 1,8 рази, що призводить до зменшення витрат енергії на власні потреби при одночасному збільшенні теплової потужності агрегату. Вартість труб круглого поперечного перерізу та плоскоовального з однаковими зовнішніми периметрами практично однакова.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).

Користувачами результатів роботи можуть бути проектні організації і промислові підприємства, що розробляють нові та удосконалюють існуючі компактні теплообмінні апарати.

Імовірні замовники результатів роботи:

- галузі: хімічне машинобудування, теплоенергетика, нафтопереробка;
- підприємства: ТОВ СПКТЬ “ЕНЕРГОМАШПРОЕКТ” (м. Київ), ПАТ „Факел”, (м. Фастів), ВАТ «Сумське НВО ім. Фрунзе» (м. Суми), ТОВ DEMO Ltd (м. Київ).

8. Стан готовності розробки.

На сьогодні розроблено надійні інженерні методики розрахунку зовнішнього теплообміну й аеродинамічного опору поодиноких труб складнопрофільованої плоскоовальної форми та їх масивів для рекуперативних теплообмінних апаратів в широкому діапазоні зміни факторів, які можуть впливати на інтенсивність теплообміну. До таких факторів слід віднести: швидкість потоку W , поперечний крок між трубами S_1 , поздовжній крок S_2 , відношення поздовжнього до поперечного розміру труби (відносне подовження профілю) d_2/d_1 . Створено наукові основи для розробки і конструювання сучасних поверхонь теплообміну для утилізації теплоти відхідних газів.

9. Існуючі результати впровадження:

Результати роботи впроваджено в навчальний процес: в курс „Спеціальні питання теплообміну” введено практичне заняття на тему „Розрахунки теплообміну та опору циліндрів різного профілю”, в дисципліну „Котельні установки ТЕС” введено новий розділ лекцій „Низькотемпературні поверхні парових котлів – економайзери, повітропідігрівники”.

В дисципліну “Методи та засоби комп’ютерного моделювання” введено нову курсову роботу на тему “CFD-моделювання процесів теплообміну і аеродинаміки складнопрофільованих труб” та нову лабораторну роботу “Обробка та узагальнення експериментальних даних з конвективного теплообміну поодиноких складнопрофільованих труб”.

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail: Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут" (НТУУ "КПІ"), теплоенергетичний факультет (ТЕФ), кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики (АЕС і ІТФ), науково-дослідна лабораторія (НДЛ) “Теплофізичні дослідження” робочий тел. факс: (044) 406-80-87, (044) 454-97-87, teram57@meta.ua

11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:

- монографії:

1. Конвективный теплообмен в элементах энергетического оборудования /Е.Н. Письменный, Э.Я. Эпик, В.А. Рогачев, А.М. Терех А.М., А.В. Баранюк. (Підготовлена до друку).

- в журналах, що входять до наукометричних БД

1. Терех О. М. Теплоаеродинамічна ефективність пакетів труб з поперечними ребрами / О. М. Терех, О. В. Семеняко, В. А. Рогачев, О. В. Баранюк, П. І. Багрій // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №2/8 (56). – С. 31–37.

2. Pis'mennyi E.N. Ways for Improving the Tubular Heaters Used in Gas Turbine Units/ E.N. Pis'mennyi. // Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59. №6. – P. 485-490.

3. Письменный Е.Н. Пути совершенствования трубчатых воздухоподогревателей ГТУ / Е.Н. Письменный// Теплоэнергетика. - 2012. - №6. – С.67-72.

4. Кондратюк В. А. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб / В.А. Кондратюк, В. О. Туз, О. М. Терех, Ю. В. Жукова, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №3/8 (57). С. 39-42.

5. Письменный С. М. Теплова ефективність шахових пакетів труб різного профілю / С. М. Письменный, В. А. Кондратюк, О. М. Терех, О. І. Руденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №5/8 (59). С. 40-42.

6. Терех А. М. Аэродинамическое сопротивление одиночных труб каплеобразной формы и визуализация их обтекания/ А. М. Терех, А. И. Руденко, Ю. В. Жукова, А. В. Семеняко, В. А. Кондратюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/8 (60) – С. 63-58.

7. Терех А. М. Аэродинамическое сопротивление и визуализация течения вокруг одиночных труб каплеобразной формы / А. М. Терех, А. И. Руденко, Ю. В. Жукова // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 86. – № 2. – С. 358-364.

8. Терех О. М. Обтікання поодиноких циліндрів в поперечному потоці / О. М. Терех, О. В. Семеняко, В. О. Туз, В. А. Кондратюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/8 (62) – С. 23-26.

9. Terekh A. M. Aerodynamic drag to flows about drop-like tubes and visualization of these flows / A. M. Terekh, A. I. Rudenko, Yu. V. Zhukova //Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – V. 86. - №2. – P. 378-384.

10. Терех О. М. Теплообмін циліндрів плоскоовального профіля при поперечному їх обтіканні / О. М. Терех, О. В. Семеняко, В. О. Туз, О. І. Руденко, В. А. Кондратюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 3/8 (63) – С. 30-34.

11. Терех О. М. Теплообмін поодиноких циліндрів краплеподібної форми в поперечному потоці / О. М. Терех, О. В. Семеняко, О. І. Руденко, В. А. Кондратюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/8 (67) – С. 27-31.

12. Pis'mennyi E.N. Universal relations for calculation of the drag of transversely finned tube bundless / E.N. Pis'mennyi, A. M. Terekh, G. P. Polupan, I. Carvajal- Mariscal, F. Sanches-Silva // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V.73, june. – P. 293-302.

13. Никитюк П. С. Особенности обтекания плоскоовальной трубы в поперечном потоке / П. С. Никитюк, А. В. Семеняко, А. М. Терех, А. И. Руденко // Международный Научно-исследовательский журнал. 2014. – № 3(22). Ч.2. – С. 60-63.

14. Кондратюк В. А. Аэродинамическое сопротивление одиночных плоскоовальных труб / В. А. Кондратюк // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. Ч.2. – №4(23). – С. 32-35.

15. Кондратюк В.А. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление малорядных пакетов плоскоовальных труб / В.А. Кондратюк, А.М. Терех, А.И. Руденко, В.С. Гайдаренко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – Ч.1. – №5(24). – С. 75-79.

- в журналах, що не входять до наукометричних БД

1. Кондратюк В. А. Теплообмен и аэродинамика одиночных труб плоскоовального профиля / В.А. Кондратюк, А. М. Терех, А. В. Семеняко, А. И. Руденко, Ю. В. Жукова // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии” 2013. - №1(12). – С.3-6.

- публікації в матеріалах конференцій, що входять до наукометричних БД

1. Кондратюк В. А. Теплообмен и аэродинамика поперечно-обтекаемых пучков плоскоовальных труб / В. А. Кондратюк, А. М. Терех, А. И. Руденко // XIV Минский международный форум по тепло-и массообмену. 10-13 сентября 2012. Минск, Беларусь. Т.1. – Часть 1. – С 142-145.

2. Жукова Ю. В. Численное исследование аэродинамических характеристик и теплоотдачи поперечно обтекаемых пакетов труб круглого сечения с внешними интенсификаторами / Ю. В. Жукова, А. М. Терех, С. А. Исаев, Е. Н. Письменный // XIV Минский международный форум по тепло-и массообмену. 10-13 сентября 2012. Минск, Беларусь. Т.1. – Часть 1. – С. 94-96.

3. Письменный Е.Н. Интенсифицированные трубчатые поверхности нагрева для теплообменников типа газ-газ/ Е.Н. Письменный//XIV Минский международный форум по тепло-и массообмену. 10-13 сентября 2012. Минск, Беларусь. Т.2. – Часть 1. – С. 132-135.

4. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление пакетов профилированных труб / Е. Н. Письменный, А. М. Терех, В. А. Кондратюк // Труды V Российской Национальной конференции по теплообмену 2014 г., 25-29 октября. Москва, Россия. Интенсификация теплообмена.

- публікації в матеріалах конференцій, які не входять до наукометричних БД

1. Кондратюк В. А. Аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних труб / В. А. Кондратюк, Є. М. Письменный // X міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики 17-20 квітня 2012. –Київ, Україна. – С.52.

2. Мейріс А. Ж. Конвективний теплообмін пучків плоскоовальних труб / А. Ж. Мейріс, В. А. Кондратюк // X міжнародна науково-практична конференція аспірантів,

магістрів, студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики 17-20 квітня 2012. –Київ, Україна. – С.71.

3. Кондратюк В. А. Теплообмін поодиноких плоскоовальних труб в умовах вимушеної конвекції / В. А. Кондратюк, Є. М. Письменний // XI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики 16-19 квітня 2013.- Київ, Україна. – С. 43.

4. Кондратюк В. А. Теплообмен одиночных цилиндров плоскоовального профиля // XIX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях. – Орехово-Зуево, Россия. 20-24 мая, 2013 г. – С. 123-124.

5. Омельчук Д.С. Нові типи низькотемпературних поверхонь нагрівання котла/ Д.С. Омельчук, В.А. Рогачов// XI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики 16-19 квітня 2013.- Київ, Україна. – С. 68.

6. Жукова Ю.В. Численное исследование аэродинамического сопротивления и теплоотдачи одиночной трубы каплеобразной формы/ Ю. В. Жукова, А. М. Терех, С. А. Исаев, Е. Н. Письменный// XIX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях. – Орехово-Зуево, Россия. 20-24 мая, 2013 г. – С. 53-54.

12. Фото або слайди (декілька фото) презентації розробки в електронному вигляді (рекламного характеру):



Експериментальні макети складнопрофільованих труб плоскоовальної форми з різним подовженням профілю