УДК 536.24:532.526

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Т. Т. Супрун, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

E-mail: suprun@secbiomass.com

Анотація. *Прогресуюча тенденція підвищення ефективності та експлуатаційної надійності обладнання вимагають постійного вдосконалення методів контролю та управління робочими процесами. Одним з найбільш перспективних методів для вивчення процесів переносу, що відбуваються в складних умовах, типових для теплоенергетичного обладнання, є фізичне моделювання.*

Об'єктом цього дослідження є теплообмінні призматичні поверхні, які характерні для багатьох технічних додатків.

Мета роботи - розроблення методів оптимізації теплообміну робочих поверхонь на основі локального контролю теплофізичних параметрів у характерних зонах робочого середовища.

Дослідження проводилися в аеродинамічному стенді АДС-1 за допомогою методів тепломасоаналогії і термоанемометрії. Компонівка включала чотири ряди призматичних елементів.

Суть локального підходу полягає у визначенні середньоповерхневого коефіцієнта тепловіддачі за локальною швидкістю, яка вимірюється над кожним призматичним елементом, що дозволяє оцінити просторову температурну неоднорідність компоновки і провести заходи щодо зміни температури в потрібному напрямку за рахунок маневрування розташуванням елементів. Пропонований підхід принципово відрізняється від іншого поширеного підходу, названого нами канальним, при якому ігнорується інформація про швидкісні і температурні поля, недостатньо враховується вплив конфігурації і розмірів елементів і їх розташування на гідродинамічну структуру потоку.

Локальний підхід дозволяє, по-перше, більш тонко діагностувати типи течії в примезовому шарі обтічного елемента, виділяючи ламінарні, турбулентні, псевдоламінарні, квазітурбулентні, перехідні і відривні режими течій. По-друге, здійснити на основі набору статистичних даних перехід до довільно заданої компоновки елементів і тим самим підвищити точність визначення температурного стану окремих призматичних елементів і всієї компоновки в цілому.

Запропоновано рівняння подібності для розрахунку локального теплообміну кожної грані призми окремо і середньоповерхневого теплообміну в залежності від геометричних і режимних параметрів. На основі отриманих рекомендацій оцінено тепловий стан елементів конкретної компоновки і розроблені заходи щодо його поліпшення за рахунок цілеспрямованих перестановок елементів.

Ключові слова: *призматична теплообмінна поверхня, локальні теплофізичні параметри, оптимальна компоновка*

Актуальність. Прогресуюча тенденція підвищення ефективності та експлуатаційної надійності обладнання вимагають постійного вдосконалення методів контролю та управління робочими процесами. Це досягається на основі проникнення в складний механізм розвитку примежових шарів і цілеспрямованого впливу на їх внутрішню структуру, що характерно для загального підходу ІТТФ НАНУ до управління процесами переносу в проточній частині теплоенергетичного обладнання різного призначення [1]. Одним з найбільш перспективних методів для вивчення процесів переносу, що відбуваються в складних умовах, є фізичне моделювання [2].

Об'єктом цього дослідження є теплообмінні призматичні поверхні, які характерні для багатьох технічних додатків. Збільшення інтенсивності процесів переносу в теплообмінному, хімічному і технологічному обладнанні часто досягається за допомогою розташованих на плоских поверхнях спеціально сконструйованих призматичних інтенсифікаторів. У деяких апаратах наявність призм на плоских поверхнях обумовлено особливостями технологічного процесу. Зокрема, призми є типовими елементами плат радіоелектронної апаратури (РЕА). Застосування методу локального контролю теплофізичних параметрів в умовах дії турбулізуючих ефектів різної природи дозволяє оптимізувати типові компоновки, розробити методи розрахунку теплообміну елементів і вузлів РЕА, що в свою чергу призводить до зниження витрат на розробку виробів, вибору необхідної потужності для системи охолодження, поліпшення конструкції апаратури, підвищенню її надійності та ресурсу. Вирішенню цього актуального завдання сприяють представлені нижче експериментальні результати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для розрахунку теплообміну елементів РЕА найбільш розповсюдженим до останнього часу був інший підхід, названий нами каналним [3]. Такий підхід принципово відрізняється від запропонованого локального підходу. При каналному підході середній теплообмін призматичних елементів розраховується за рівнянням подібності для стабілізованої

течії в каналах з введенням поправочних коефіцієнтів на умови входу, геометрію каналу і розташування елементів. При цьому число Рейнольдса для всіх елементів визначається за середньовитратною швидкістю, тобто приймається однаковим для будь-якого з елементів в даному каналі, а діагностика типу течії в примежовому шарі, що розвивається на поверхні елемента, проводиться тільки на основі цього числа Рейнольдса, не виділяючи ламінарні, турбулентні, псевдоламінарні, квазитурбулентні, перехідні і відривні режими течій [4]. Обмеженість такого підходу очевидна, тому що ігнорується інформація про швидкісні і температурні поля, грубо діагностується тип течії, недостатньо враховується вплив конфігурації і розмірів елементів і їх розташування на гідродинамічну структуру потоку.

Мета дослідження – розроблення методів оптимізації теплообміну робочих поверхонь на основі локального контролю теплофізичних параметрів у характерних зонах робочого середовища.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження впливу турбулізуючих ефектів різної природи на обтікання призматичних елементів, розташованих на плоскій поверхні, був створений спеціальний аеродинамічний стенд АДС-1. Перевірка теплової ефективності окремих призматичних елементів проводилась для компоновки, показаної на рис.1, яка включала чотири ряди призматичних елементів. Турбулентність у першому ряду створювалася вхідними умовами, а в другому, третьому та четвертому - слідами попередніх рядів; відрив потоку виникав при обтіканні вхідних кромek елементів. На рис.1. кожна призма позначена номером, перша цифра якого відповідає номеру ряду за ходом обтікання повітрям, а друга – її порядковому номеру в ряду. У цій роботі проводилося порівняння середнього теплообміну призми №23, розташованої в позиції 1 (умови обтікання 1), і призми №43 в позиції 2 (умови обтікання 2). Ці умови з точки зору гідродинаміки течії були принципово відмінними одна від одної, що буде детально описано нижче.

• φ • φ •

• • •

швидкостей потоку над різними призматичними елементами U_{ii} щодо їх середньовитратних значень в робочому каналі стенду $\bar{U}$ (табл.1). Як видно з табл. 1, відносні локальні швидкості $U_{ii}/\bar{U}$ коливаються в досить широких межах: від 0.47 до 1.20. Тому використання середньовитратної швидкості при проведенні відповідних розрахунків в загальному випадку може привести до значних відмінностей між розрахованими і дійсними значеннями коефіцієнтів тепловіддачі призм.

1. Відносні локальні швидкості потоку над різними призматичними елементами

№ призми	11	14	16	23	24	31	34	36	41	43	44
$U_{ii}/\bar{U}$	0.86	1.20	1.07	0.75	0.88	0.47	0.63	0.47	0.63	0.62	0.55

Як свідчать результати візуалізації, зони відриву, які розташовані на призмах і зумовлені особливостями їх обтікання, мають різну протяжність: максимальну - в кінцевому (четвертому) ряду і мінімальну - в першому. Збільшення протяжності зон відриву на верхніх гранях призм за довжиною каналу (умови обтікання 1 і 2) свідчить про загальну тенденцію зменшення частини кінетичної енергії турбулентності, яка сприймається примежовими шарами, що розвиваються на цих гранях, тобто безпосередньо впливає на процес їх обтікання. Всі ці характерні аеродинамічні особливості обтікання елементів 1 і 2 мають істотний вплив, як на середній теплообмін цих елементів, так і на локальні коефіцієнти тепловіддачі.

Визначення середнього теплообміну проводилося для 11 призм, розташованих в кожному з чотирьох рядів даної компоновки. Аналіз отриманих результатів показав, що інтенсивність середнього теплообміну для призм, розташованих в позиціях 1 (призма №23) і 2 (призма №43), різна, що пов'язано з аеродинамічними особливостями їх обтікання. Середній коефіцієнт тепловіддачі для призми №23 практично збігається зі значеннями середніх коефіцієнтів тепловіддачі для призм, розташованих в перших трьох рядах компоновки та з похибкою $\pm 7 \%$ узагальнюються залежністю:

$$\overline{Nu} = C Re^{0.6}, \quad (1)$$

де $C = 0.536$.

Показник ступеня 0.6 при числі Рейнольдса свідчить про існування псевдоламінарного примежового шару (ПЛПШ) на поверхнях більшості призм [5]. Особливістю ПЛПШ є інтенсифікація теплообміну, яка може бути оцінена відношенням середніх коефіцієнтів тепловіддачі в ньому до їх значень в ламинарному примежовому шарі, визначених за відомою залежністю:

$$\overline{Nu} = 0.59 Re^{0.5}. \quad (2)$$

Інтенсифікація теплообміну в ПЛПШ прогресує зі зростанням числа Рейнольдса. Для 1-3 рядів інтенсифікація середнього теплообміну при числах Рейнольдса 10^3 становить ~ 1.7 - 1.9 , а при 10^4 - 2.1 - 2.4 .

На особливу увагу заслуговує аналіз теплообміну призм кінцевого (четвертого) ряду (рис.2).

Рис. 2. Середній теплообмін останнього ряду призм, розташованих на плоскій поверхні: 1 - призма №41; 2 - 43; 3 - 44

Як видно з рис. 2, для елементів четвертого ряду характерні як ламинарний (призма №41), так і псевдоламинарний режими течії (призми №43, 44) різної інтенсивності, які також узагальнюються залежністю (1), де $C = 0.34$ для призми №43 і $C = 0.56$ для призми №44. Середній теплообмін призм останнього ряду менш інтенсивний порівняно з теплообміном призм перших трьох рядів. Так, для призми №43 інтенсифікація середнього теплообміну при $Re \approx 3 \cdot 10^2$ становить ~ 1.4 , а при

$Re \approx 3 \cdot 10^3 - \sim 1.65$. Порівняльний аналіз тепловіддачі елемента в умовах обтікання 1 і 2 показує, що при конструктивній розробці плоскої поверхні з призматичними елементами найбільш теплонапружені з них необхідно розташовувати в умовах максимального знімання теплоти. При цьому в даному випадку такими умовами виявилися умови обтікання 1.

Згідно локального підходу в рівнянні (1) для розрахунку середнього теплообміну необхідно використовувати локальні швидкості потоку над призмою. З урахуванням залежності $(U_{ii}/\overline{U}_n)^n$, що зв'язує локальну швидкість потоку над призмою U_{ii} зі середньовитратною в каналі $\overline{U}_n$, рівняння подібності (1) матиме такий вигляд:

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_{cp} (U_{ii}/\overline{U}_n)^n, \quad (3)$$

де $\overline{Nu} = C Re^n$, $\overline{Nu}_{cp} = C Re_{cp}^n$, а Re і Re_{cp} - числа Рейнольдса, визначені по локальній (U_{ii}) і середньовитратній ($\overline{U}_n$) швидкостям відповідно.

Визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі проводилося на основі розподілів локального масоуносу на гранях моделі призми. Розподіли локальних коефіцієнтів тепловіддачі по центральній осі кожної грані (при $U = 5$ м/с, $Re = 4200$) для призми №23 представлені на рис.3.

Рис. 3. Розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі вздовж центральних осей граней призми №23

На верхній і бічних гранях спочатку виникає відривна течія, що призводить до появи в розподілах $\alpha = f(x)$ максимумів, розташованих на відстанях x_r від

передньої кромки елемента і відповідних точках повторного приєднання потоку. За цією точкою при $x > 1.25 x_r$ починається розвиток ПЛПШ.

Основні результати експериментального дослідження представлені в табл.2. Вони можуть використовуватися для розрахунків безазорно встановленого на плоскій поверхні одиночного призматичного елемента при обтіканні сильно турбулізованим повітряним потоком. Для наведених в табл.2 даних в дослідженому діапазоні чисел Рейнольдса тепловий баланс для всього елемента зводиться з максимальною похибкою + 4.3% (при $Re = 500$). При проведенні цих розрахунків середній коефіцієнт тепловіддачі всього елемента розраховувався на основі визначених за таблицею середніх коефіцієнтів тепловіддачі кожної грані з урахуванням її поверхні.

2. Рекомендації щодо розрахунку середнього теплообміну безазорно встановленого на плоскій поверхні в потоці призматичного елемента і його граней в 1-3 рядах

Загальний вигляд рівняння		$\overline{Nu} = C Re^n$		
подібності				
Середній теплообмін	Визначальний розмір	Поверхня теплообміну	C	n
Елемент в цілому	C	$\sum F$	0.536	0.6
Верхня грань	C	$C \times B$	0.536	0.6
Бокова грань	C	$C \times h$	0.487	0.6
Лобова грань	h	$B \times h$	0.75-0.89	0.5
Кормова грань	h	$B \times h$	0.116	0.667

Такий підхід дозволяє виділити роль кожної грані в сумарному теплообміні. Так, наприклад, для даного елемента внесок верхньої грані є превалюючим і становить 50 % у сумарному зніманні теплоти (за умови сталості температурного напору). У той же час найбільш високими виявляються коефіцієнти тепловіддачі на лобовій грані, які перевищують в 1.6-2 рази їх значення на верхній грані, компенсуючи тим самим меншу інтенсивність теплообміну на кормовій і бічних гранях. Це призводить до того, що сумарний коефіцієнт тепловіддачі практично

збігається із середнім коефіцієнтом тепловіддачі на верхній грані. При цьому внесок передньої грані в сумарний теплообмін становить всього 19-22 % (при $Re=4000$ і 500 відповідно).

Висновки і перспективи. Проведено комплексні експериментальні дослідження процесів переносу теплоти і імпульсу в складних умовах взаємодії зовнішніх (підвищена турбулентність) і внутрішніх (відрив) турбулізуючих ефектів, типових для теплоенергетичного обладнання різного призначення. Отримано банк нових експериментальних даних по інтенсивності процесів, що протікають, для плоскої поверхні з призматичними елементами. При проведенні досліджень використано локальний підхід, перевагою якого є можливість фіксування теплофізичних параметрів процесу в будь-якій характерній зоні робочого простору. Для поверхні з призматичними елементами використання локального підходу дозволяє визначити середньоповерхневі (за необхідності - також локальні для кожної грані) коефіцієнти тепловіддачі окремого елемента та вимірюючи над ним локальною швидкістю. Це дозволяє врахувати просторову нерівномірність поля температур і організувати заходи щодо усунення температурної неоднорідності. Запропоновано рівняння подібності для розрахунку локального теплообміну кожної грані призми окремо і середньоповерхневого теплообміну залежно від геометричних і режимних параметрів. На основі отриманих рекомендацій оцінено тепловий стан елементів конкретної компоновки і розроблені заходи щодо його поліпшення за рахунок цілеспрямованих перестановок елементів.

Доцільність використання локального підходу була підтверджена також для управління процесами переносу в теплоенергетичному обладнанні різного призначення, зокрема, при проведенні досліджень надчистих приміщень (НЧП). На основі локального контролю теплофізичних характеристик мікроструктури повітряних потоків у надчистих приміщеннях, проведеного за допомогою багатоканальної системи вимірювань температури і швидкості термоанемометричного типу, були розроблені конкретні заходи щодо поліпшення якості таких приміщень [6]. Впровадження запропонованих заходів привело до істотного зниження енергоспоживання в НЧП.

Список використаних джерел

1. Супрун Т.Т. Методи управління перехідними процесами на обтічних поверхнях енергетичного обладнання. Промислова теплотехніка. 2017. Т.39. №7. С.125.
2. Супрун Т. Моделювання зсувного і беззсувного потоку з періодичною швидкісною нестационарністю. Теплофізика та Теплоенергетика. 2018. Т40. №2. С. 72-77.
3. Гидалевич В.Б., Мироненко Ю.П., Спокойный Ю.Е., Трофимов В.Е., Исайченко В.В. Определение локальных коэффициентов теплообмена микросхем с принудительным воздушным охлаждением. Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО. 1983. №3. С.3-9.
4. Erik Dick, Slawomir Kubacki. Transition Models for Turbomachinery Boundary Layer Flows: A Review. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 2017. Vol. 2, Issue 2. P. 1-45.
5. E.Ya.Epik, T.T.Suprun. Impulse and heat transport processes at bypass transition. Eurasian Physical Technical Journal. 2007. Vol.4, No.1(7). P.52-57.
6. Эпик Э.Я., Супрун Т.Т., Мельник В.Д. Термоанемометрический метод диагностики микроструктуры воздушных потоков в сверхчистых помещениях. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №1-2. С.5-11.

References

1. Suprun, T.T. (2017). Metody upravlinnya perekhidnymy protsesamy na obtichnykh poverkhnyakh enerhetychnoho obladdnannya [Methods of control of transients on streamlined surfaces of power equipment]. Industrial heat engineering, 39(7), 125.
2. Suprun, T. (2018). Modelyuvannya zsuвноho i bezzsuвноho potoku z periodychnoyu shvydkisnoyu nestatsionarnistyu [Modelling of shear and shearless flow with periodic velocity nonstationarity]. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 40(2), 72-77. [doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.10](https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.10)
3. Gidalevich, V.B., Mironenko, Yu.P., Spokoyny, Yu.E., Trofimov, VE, Isaychenko, V.V. (1983). Opredeleniye lokal'nykh koeffitsiyentov teploobmena mikroskhem s prinuditel'nym vozdushnym okhlazhdeniyem [Determination of local heat transfer coefficients of microcircuits with forced air cooling]. Radio electronics issues. Series TRTO, 3, 3-9.
4. Dick, Erik, Kubacki, Slawomir. (2017). Transition Models for Turbomachinery Boundary Layer Flows: A Review. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power, 2(2), 1-45. doi:10.3390/ijtp2020004
5. Epik, E.Ya., Suprun, T.T. (2007). Impulse and heat transport processes at bypass transition. Eurasian Physical Technical Journal, 4/1(7), 52-57.
6. Epik, E.Ya., Suprun, T.T., Melnik, V.D. (2001). Termoanemometricheskiy metod diagnostiki mikrostruktury vozdushnykh potokov v sverkhchistyykh pomeshcheniyakh [Hot-wire anemometric method for diagnosing the microstructure of air flows in ultra-clean rooms]. Industrial heat engineering, 23(1-2), 5-11.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Т. Т. Супрун

Аннотация. *Прогрессирующая тенденция повышения эффективности и эксплуатационной надежности оборудования требуют постоянного совершенствования методов контроля и управления рабочими процессами. Одним из наиболее перспективных методов для изучения процессов переноса, происходящих в сложных условиях, типичных для теплоэнергетического оборудования, является физическое моделирование.*

Объектом данного исследования является теплообменные призматические поверхности, которые характерны для многих технических приложений.

Цель работы - разработка методов оптимизации теплообмена рабочих поверхностей на основе локального контроля теплофизических параметров в характерных зонах рабочей среды.

Исследования проводились в аэродинамическом стенде АДС-1 с помощью методов тепломассоаналогии и термоанемометрии. Компоновка включала четыре ряда призматических элементов. Суть локального подхода заключается в определении среднеповерхностного коэффициента теплоотдачи по локальной скорости, измеряемой над каждым призматическим элементом, что позволяет оценить пространственную температурную неоднородность компоновки и провести мероприятия по изменению температуры в нужном направлении за счет маневрирования расположением элементов. Предлагаемый подход принципиально отличается от другого распространенного подхода, названного нами канальным, при котором игнорируется информация о скоростных и температурных полях, недостаточно учитывается влияние конфигурации и размеров элементов и их расположения на гидродинамическую структуру потока.

Локальный подход позволяет, во-первых, более тонко диагностировать типы течения в пограничном слое обтекаемого элемента, выделяя ламинарные, турбулентные, псевдоламинарные, квазитурбулентные, переходные и отрывные режимы течений. Во-вторых, осуществить на основе набора статистических данных переход к произвольно заданной компоновке элементов и тем самым повысить точность определения температурного состояния отдельных призматических элементов и всей компоновки в целом.

Предложены уравнения подобия для расчета локального теплообмена каждой грани призмы отдельно и среднеповерхностного теплообмена в зависимости от геометрических и режимных параметров. На основе полученных рекомендаций оценено тепловое состояние элементов конкретной компоновки и разработаны мероприятия по его улучшению за счет целенаправленных перестановок элементов.

Ключевые слова: *призматическая теплообменная поверхность, локальные теплофизические параметры, оптимальная компоновка*

OPTIMIZATION OF WORKING SURFACES HEAT TRANSFER BASED ON LOCAL CONTROL OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS

T. Suprun

Abstract. *The progressive trend of increasing the efficiency and operational reliability of equipment requires continuous improvement of methods for monitoring and managing work processes. One of the most promising methods for studying transport processes occurring in difficult conditions is physical modeling.*

The object of this research is heat-exchange prismatic surfaces, which are typical for many technical applications.

The purpose of the work is to develop methods for optimizing heat transfer of working surfaces based on local control of thermophysical parameters in characteristic zones of the working environment.

The studies were carried out in the ADS-1 aerodynamic stand using the methods of heat and mass analogy and hot-wire anemometry. The arrangement included four rows of prismatic elements.

The essence of the local approach is to determine the average surface heat transfer coefficient from the local velocity, measured above each prismatic element, which makes it possible to estimate the spatial temperature heterogeneity of a specific arrangement and take measures to change the temperature in the desired direction by maneuvering the location of the elements. The proposed approach is fundamentally different from another widespread approach, which we called the channel one, in which information about the velocity and temperature fields is ignored, and the influence of the configuration and size of elements and their location on the hydrodynamic structure of the flow is insufficiently taken into account. The local approach allows, firstly, to more accurately diagnose the types of flow in the boundary layer of a streamlined element, determining laminar, turbulent, pseudolaminar, quasiturbulent, transition and separated flow regimes. Second, on the basis of a set of statistical data, make the transition to an arbitrarily specified arrangement of elements and thereby increase the accuracy of determining the temperature state of individual prismatic elements and the entire arrangement as a whole.

Equations of similarity are proposed for calculating the local heat transfer of each face of the prism separately and the average surface heat transfer depending on the geometric and operating parameters. On the basis of the recommendations received, the thermal state of the elements of a specific arrangement was evaluated and measures were developed to improve it through targeted rearrangements of the elements.

Key words: *prismatic heat exchange surface, local thermophysical parameters, optimal arrangement*