

РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В ОБЛАСТЯХ ІЗ ВІДРИВНИМИ ТЕЧІЯМИ. 1. СПРОЩЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

*В. Г. Горобець, доктор технічних наук
e-mail: gorobetsv@ukr.net*

Анотація. Розроблено спрощену методику розрахунку теплообміну в областях із відривними течіями. Методика базується на розбитті відривної області на три гідродинамічні зони: I – зону пограничного шару біля стінки; II – зону вихрового ядра; III – зону приєднаної зовнішньої течії за вихровим ядром. У результаті розрахунку, згідно з розробленою методикою, у відривній області знаходяться всі теплообмінні характеристики у цій області.

Ключові слова: *область із відривною течією, теплообмін, пограничний шар, вихрове ядро, приєднана течія.*

Течія зовнішнього теплоносія біля поверхні обтікання, разом з областями формування пограничного шару (ПШ) або ділянками розвиненої течії, може мати зони, де відбувається відрив зовнішньої течії. Розрахунок гідродинаміки й теплообміну в цих зонах є складним завданням, яке в загальному випадку потребує рішення рівнянь Нав'є-Стокса. Проте для деяких типів відривних течій задача розрахунку течії та теплообміну дещо спрощується. Це стосується течій, коли у відривній зоні формується поодинокий вихор. До таких течій належать поворотні течії в області прямого і зворотного уступу, течії у виїмках, що мають невелику глибину, деякі типи поворотних течій при натіканні струменя на поверхню та ряд інших випадків.

Мета досліджень – розробка спрощеної методики розрахунку теплообміну в області відривних течій.

Матеріали та методика досліджень. Відривні течії в кутових зонах, заглибленнях, зонах з уступами характеризуються наявністю поодинокого відривного вихору, який має швидкість течії істотно меншу, порівняно зі швидкістю зовнішньої течії. У найбільш простому наближенні, виходячи з гіпотези Бетчелора [1], вихор можна розглядати як нерухоме ядро рідини, яке омивається зовнішнім потоком. Експериментальні й теоретичні дослідження показують [2, 3], що швидкість течії у вихорі змінюється від нульового значення в центрі вихору до деякої постійної величини на зовнішній його поверхні, значення якої залежить від швидкості зовнішньої потенційної течії і в'язкістних характеристик зовнішнього теплоносія.

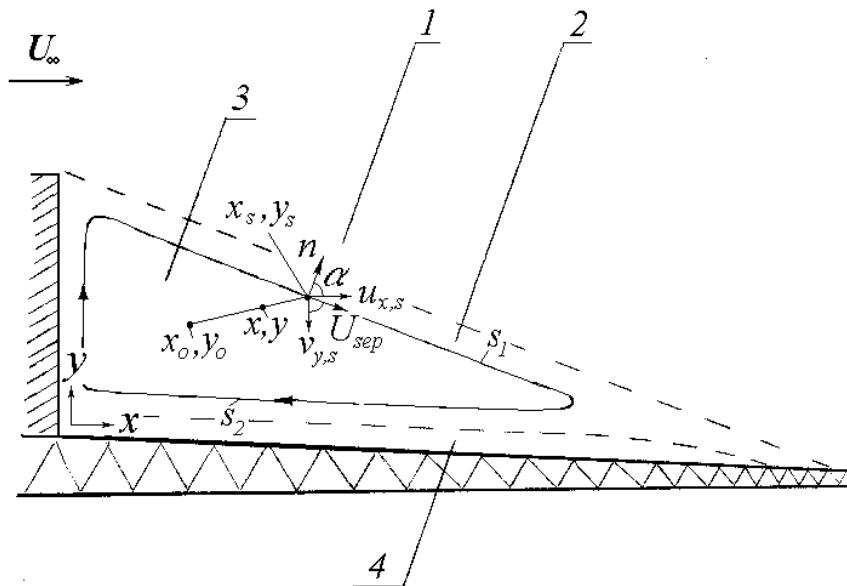
В області відриву на поверхні стінки формується ПШ, а між вихровим ядром і зовнішнім потоком є так званий шар змішування, структура течії в якому близька до течії в ПШ. Виходячи з таких передумов, було запропоновано різні моделі відривної течії та методи їх розрахунку. Особ-

ливо детально розроблені розрахункові методики подібного типу для відривних течій з великою швидкістю зовнішнього потоку і надзвукових течій (теорія Чепмена, Корста та ін.) [2]. Деяко інший підхід використали Лаврентьєв і Шабат, а також Гольдштик для розрахунку відривних течій з поодиноким вихором при поперечному обтіканні траншей і виступів [4].

Таким чином, відривну область можна умовно розглядати як таку, що складається з декількох зон, які мають різну структуру течії. А саме: в області відривної течії є зовнішня потенційна течія 1, зона змішування 2 між зовнішньою течією і відривним вихором, область потенційної вихрової течії 3 і зона ПШ 4 в пристінній області (див. рисунок).

Аналіз гідродинамічних характеристик відривних течій, отриманих при чисельному розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса в усій даній області і експериментальних даних, отриманих із використанням лазерної вимірювальної техніки [2, 3] свідчить, що розподіл швидкостей у вихорі має достатньо простий профіль, для якого значення швидкості змінюється від нуля в центрі вихору до деякого постійного значення на зовнішній його границі. При цьому існує деяка загальна залежність між швидкістю зовнішньої течії та швидкістю потенційної течії у вихровій області на зовнішній її границі

$$U_{sep} = K_U U_{\infty}. \quad (1)$$



Розрахункова схема відривної течії:

- 1 – зовнішня течія; 2 – зона змішування; 3 – область потенційної вихрової течії;
4 – зона ПШ у пристінній області

Коефіцієнт K_U , згідно з наявними дослідженнями [2, 3], для виїмок малої глибини і невисоких уступів рівний $K_U = 0,2 - 0,3$. Залежність (1) дозволяє визначати швидкість течії на зовнішній границі вихору, якщо відома швидкість зовнішньої потенційної течії.

Температура вихрового ядра визначається при розв'язку рівняння теплопровідності в зоні 3

$$u_x \frac{\partial T_{gs}}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_{gs}}{\partial y} = a_g \left(\frac{\partial^2 T_{gs}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{gs}}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

де u_x, v_y – подовжня і поперечна складові швидкості вихрової течії у відривній зоні (див. рисунок).

На зовнішній поверхні контуру вихору виконуються граничні умови

$$\left. \frac{\partial T_{gs}}{\partial n} \right|_{n=s_1} = q_{s_1}, \quad \left. \frac{\partial T_{gs}}{\partial n} \right|_{n=s_2} = q_{s_2}, \quad (3)$$

де n – нормаль до поверхні зовнішнього контуру зони 3;

s_1, s_2 – відповідно, зовнішній контур зони 3 на поверхні стінки і на межі шару змішування;

q_{s_1}, q_{s_2} – відповідно, густина теплових потоків на поверхні обтічного тіла і в зоні змішування на межі вихрового ядра і зовнішнього потоку.

Оцінки показують, що переважаючий вклад у рівнянні (2) вносить конвективна складова теплового потоку. Як свідчить аналіз розрахункових і експериментальних досліджень, температура T_{gs} мало змінюється у вихровій зоні і в першому наближенні її можна приймати постійною. Значення T_{gs} можна визначити при розв'язку рівняння балансу теплових потоків на межі розділів між циркуляційним ядром і обтічною стінкою, з одного боку, і зовнішнім потоком, з іншого:

$$\int_{s_1} \alpha_1(s) (T_{g\infty} - T_{gs}) ds_1 = \int_{s_2} \alpha_2(s) (T_{gs} - T_s) ds_2 \quad (4)$$

або

$$\bar{\alpha}_1 (T_{g\infty} - T_{gs}) F_1 = \bar{\alpha}_2 (T_{gs} - T_s) F_2, \quad (5)$$

Індекси 1 і 2 в (4), (5) позначають, відповідно, межу розділу зовнішній потік – відривне ядро і відривне ядро – стінка, а F_1 і F_2 – площі меж розділу. З (5)

знаходимо шукане значення температури ядра

$$T_{gs} = \left(\frac{\bar{\alpha}_1 F_1}{\bar{\alpha}_2 F_2} \right)^{-1} \left(T_s + \frac{\bar{\alpha}_1 F_1}{\bar{\alpha}_2 F_2} T_{g\infty} \right). \quad (6)$$

У співвідношенні (6) використані усереднені по поверхні коефіцієнти тепловіддачі $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$, обчислені на межі розділу. Згідно з наявними дослідженнями [3], навіть для великих швидкостей зовнішньої течії ПШ, що формується в пристінному шарі відривної області, близький до ламінарного і для розрахунку $\bar{\alpha}_2$, враховуючи співвідношення $\bar{\alpha} = Nu \lambda_g / L$ (L – довжина межі розділу), можна використати розрахункове значення $\bar{\alpha}$,

яке знаходиться при розв'язку конкретної задачі спряженого теплообміну, або визначаючи її по відомій залежності для ізотермічної стінки [5]

$$Nu_L = c Pr^n Re^m, \quad (7)$$

де $Re = U_{sep} L / \nu$ – число Рейнольдса для відривної течії, а коефіцієнт c і показники степеня n, m визначаються на підставі розрахункових або експериментальних даних.

При визначенні усереднених значень коефіцієнта тепловіддачі в області змішування $\bar{\alpha}_1$ необхідно визначити відносну швидкість $U_{s\infty} = U_\infty - U_{sep}$ і, залежно від її значення, по відомих формулах (7) розрахувати її значення для ламінарного або турбулентного режимів течії у шарі змішування, де $Re = U_{s\infty} L / \nu$ – число Рейнольдса, обчислене по відносній швидкості $U_{s\infty} = U_\infty - U_{sep}$.

Використовуючи знайдені значення швидкості течії U_{sep} і температури T_{gs} у вихорі, проводиться розрахунок теплопереносу для обтічної поверхні, а саме, знаходяться локальні характеристики теплообміну та сумарний тепловий потік, який відводиться (підводиться) від поверхні обтікання

$$Q_s = 2 \int_S \alpha_s(x, y, z) (\tilde{T}_s(x, y, z) - T_{gs}) ds, \quad (8)$$

де $\alpha_s(x, y, z)$, $\tilde{T}_s(x, y, z)$ – локальні значення коефіцієнта тепловіддачі і температури на поверхні стінки (індекс s позначає поверхню обтікання, а змінні x, y, z – їх поточні значення на поверхні в декартовій системі координат).

Висновки

1. Розроблено спрощену методику розрахунку теплообміну в області відривних течій, яка базується на розбитті відривної течії на три зони гідродинамічної течії: а) зону пограничного шару біля стінки; б) зону вихрового ядра; в) зону приєднаної зовнішньої течії за вихровим ядром.

2. У результаті розрахунку за спрощеною методикою, знаходяться такі характеристики теплообміну, як: швидкість течії у вихровому ядрі, коефіцієнт тепловіддачі по поверхні стінки, загальний відведений тепловий потік та інші теплові характеристики.

Список літератури

1. Batchelor G. K. On steady laminar flow with closed stream lines at large Reynolds number / G.K. Batchelor // J. Fluid Mechanic. – 1956. –V.1. – P.177.
2. Чжен П. Отрывные течения / П. Чжен. – М. : Мир, 1972. – Т.1–3.
3. Бормусов А. А. Влияние внешней турбулентности на течение в прямоугольной полости // А. А. Бормусов, Г. А. Глебов, А. Н. Щелков // Механика жидкости и газа. – 1986. – № 2. – С. 162–166.
4. Лаврентьев М. А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М. : Наука. – 1977. – 407 с.
5. Себиси Т. Конвективный теплообмен / Т. Себиси, П. Брэдшоу. – М. : Мир, 1987. – 590 с.

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА В ОБЛАСТЯХ С ОТРЫВНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ. 1. УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В. Г. Горобец

Аннотация. Разработана методика расчета теплообмена в областях с отрывными течениями. Методика базируется на разбиении отрывной области на три гидродинамические зоны: I – зону пограничного слоя у стенки; II – зону вихревого ядра; III – зону присоединенного внешнего течения за вихревым ядром. В результате расчета, в соответствии с разработанной методикой, в отрывной области находятся все теплообменные характеристики в этой области.

Ключевые слова: область с отрывным течением, теплообмен, пограничный слой, вихревое ядро, присоединенное течение.

CALCULATION OF HEAT TRANSFER IN AREAS WITH SEPARATED FLOWS. 1. SIMPLIFIED PROCEDURE OF CALCULATION

V. Gorobetz

Annotation. The method of calculating heat transfer in the areas of separated flow is developed. The technique is based on partition of the separated area for three hydrodynamic zones: I – zone boundary layer near the wall; II – zone of the vortex core; III – zone attached flow to outer reaches of the vortex core. As a result of calculation in the field vortex flow the all heat characteristics in this area are found.

Key words: region of separated flow, heat transfer, boundary layer, vortex core, attached flow.

УДК 536.24

РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В ОБЛАСТЯХ ІЗ ВІДРИВНИМИ ТЕЧІЯМИ. 2. РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В КУТОВИХ ЗОНАХ ТА ВИЇМКАХ

*В. Г. Горобець, доктор технічних наук
e-mail: gorobetsv@ukr.net*

Анотація. Спрощена методика розрахунку теплообміну в областях із відривними течіями застосована для розрахунку процесів теплопереносу в кутових зонах та виїмках для ребрених поверхонь. У результаті проведеного розрахунку, отримано розподіли локальних коефіцієнтів тепловіддачі та температурні розподіли на поверхні обтікання для досліджуваних об'єктів.

© В. Г. Горобець. 2015