УДК 536.24.021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛАХ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ

[1]Лаптев А.Г., [2]Башаров М.М., [3]Рунов Д.М.

[1]ФГБОУ ВПО «Казанский Государственный энергетический университет», Казань, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru;
[2]ОАО «ТАНЕКО», Нижнекамск, e-mail: basharov_mm@taneco-npz.ru;
[3]Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти ОАО «Татнефть», Бугульма, e-mail: Runov_b81@mail.ru

На основе использования модели турбулентного пограничного слоя, с функцией турбулентной вязкости Дайслера, получено выражение для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при обтекании плоской поверхности. Показано согласование с экспериментальными данными для пластины и трубы. Выполнена корректировка параметров полученного уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи от поверхностей с элементами интенсификации (шероховатость, закрутка потока и т.п.). Корректировка заключается в введении относительных коэффициентов сопротивления возмущенных и невозмущенных потоков в степени 0,5 и динамической скорости. Получены выражения для чисел Нуссельта и Стантона для каналов с шероховатой поверхностью и закруткой потока. Показано согласование с известными экспериментальными данными различных авторов.

Ключевые слова: пограничный слой, коэффициент теплоотдачи, интенсификация теплообмена, закрученный поток, шероховатость, гидравлическое сопротивление

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A CHANNEL WITH ELEMENTS OF THE INTENSIFICATION

[1]Laptev A.G., [2]Basharov M.M., [3]Runov D.M.

[1]FSBEI HPE «Kazan State Power Engineering University», Kazan, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru;
[2]JSC «TANECO», Nizhnekamsk, e-mail: basharov_mm@taneco-npz.ru;
[3]«Tatar Oil Research and Design Institute» (TatNIPIneft) of the «Tatneft» JSC, Bugulma, e-mail: runov_b81@mail.ru

Through the use a model of a turbulent boundary layer, with the function of the turbulent viscosity Deisler, was obtained an expression for calculating the average heat transfer coefficient of the flow around a flat surface. Displaying matching with experimental data for a plate and pipe. Was made the correction of parameters of the obtained equation for calculating the coefficients of heat transfer from surfaces with elements of the intensification (roughness, swirling flow, etc.). The correction consists in introduction of relative coefficients of resistance perturbed and unperturbed flow to the degree of 0,5 and a dynamic rate. Expressions are obtained for the Nusselt numbers and Stanton for channels with a rough surface and a swirling flow. Displaying agreement with known experimental data of different authors.

Keywords: boundary layer, heat transfer coefficient, heat transfer intensification, swirling flow, roughness, hydraulic resistance

Одной из важных и актуальных задач в различных отраслях промышленности и энергетике является повышение эффективности проводимых процессов. Например, повышение эффективности теплообмена может выполняться с помощью как активных, так и пассивных методов. К пассивным методам относятся – создание искусственной шероховатости поверхности, выступы, кольцевые накатки, закрутка потока в канале и т.д. При этом одной из основных задач является определение коэффициентов теплоотдачи от таких поверхностей. В данной статье рассмотрен приближенный подход определения средних коэффициентов теплоотдачи в каналах с шероховатой стенкой и закруткой потока. Для этого используется модель пограничного слоя с функцией турбулентной вязкости Дайслера с учетом затихания турбулентных пульсаций по модели Ландау и Левича.

Приближенное математическое описание процессов переноса в пограничном слое связано с моделями Прандтля, Кармана, Ландау и Левича, и др., а также с развитием гидродинамической аналогии Рейнольдсом и Чилтоном – Кольборном. Причем наиболее теоретически обоснованной и перспективной является модель диффузионного пограничного слоя Ландау – Левича [3 ,8, 9]. Известно, что турбулентный пограничный слой, как и всякая устойчивая статистическая система, имеет некоторые консервативные свойства [5, 6, 11]. На важную особенность пристенной турбулентности – весьма слабую зависимость некоторых характеристик осредненного течения по отношению к внешним возмущениям – особое внимание обратил С.С. Кутателадзе совместно с А.И. Леонтьевым. На основе предельных относительных законов теплообмена и трения были созданы расчетные методы [5–7].

Теоретическая основа рассмотренного ниже подхода заключается в использовании известных свойств консервативности законов трения к продольному градиенту давления в пограничном слое, т.е. структура математического описания элементарных актов переноса инвариантна к различным возмущениям и масштабу аппарата. Влияние этих факторов не изменяет структуру математического описания пограничного слоя, а учитывается параметрически [3, 8, 9].

Определение коэффициентов теплоотдачи

Допущения к математической модели теплоотдачи:

– входной участок значительно меньше длины обтекаемого тела (канала) и поэтому им можно пренебречь. При небольшой длине канала влияние входного участка можно учесть известными поправками;

– теплофизические свойства среды поперек пограничного слоя изменяются незначительно. При больших градиентах температур влияние можно учесть известными поправками;

– турбулентное число Прандтля близко к единице;

– основное сопротивление процессу теплоотдачи сосредоточено в пограничном слое, где происходит молекулярный перенос тепла в сочетании с затухающей турбулентной диффузией (модель Ландау-Левича).

Сопротивление переносу тепла в турбулентном пограничном слое записано в виде [8, 9]:

$$\frac{1}{\alpha}=\int_0^{\delta}\frac{q^* dy}{\rho c_p(a+a_т(y))}, \qquad (1)$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/ (м^2·К); q^* – относительная плотность теплового потока; ρ – плотность среды, кг/м^3; c_p – теплоемкость среды, Дж/(кг К); a, $a_т$ – коэффициенты молекулярной и турбулентной температуропроводности, м^2/с; δ – толщина пограничного слоя, м; y – поперечная координата, м.

Коэффициент турбулентного переноса $a_т = \nu_т/\mathrm{Pr}_т$, принят в форме функции Дайслера [11]

$$\frac{\nu_T}{\nu}=0{,}124u_+y_+\left[1-\exp(-0{,}124u_+y)\right], \qquad (2)$$

где $y_+ = y/y_*$; $u_+ = u/u_*$; $y_* = \nu/u_*$; u_* – динамическая скорость, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с, / $\mathrm{Pr}_т = \nu_т/a_т$ – турбулентное число Прандтля; $\nu_т$ – коэффициент турбулентной вязкости, м^2/с, ($\mathrm{Pr}_т \approx 1$).

После интегрирования (1) с функцией (2) получена формула для коэффициента теплоотдачи при осевом движении потока в канале в виде:

$$\alpha=\frac{\rho c_p u_*}{k\,\mathrm{Pr}^{0,66}+b\ln(R_\delta/R'+c)}, \qquad (3)$$

где безразмерные величины связаны с областью интегрирования и установлены в виде: $k = 13{,}91$; $b = 2{,}5$; $R' = 30$; $c = 0{,}14$; Pr – число Прандтля.

Показатель степени при числе Прандтля $\mathrm{Pr}^{0,66}$ следует из закона затухания турбулентных пульсаций в пограничном слое.

Уравнение (3) является достаточно общим и позволяет определять коэффициенты теплоотдачи для различных условий турбулентного движения среды при соответствующих вычислениях его параметров.

Теплоотдача от пластин в трубе

Первоначально выполним проверку уравнения (3) для пластины и трубы.

При движении среды в турбулентном режиме вдоль плоской поверхности параметры уравнения (3) имеют вид [7, 11]: динамическая скорость:

$$u_* = u_\infty\sqrt{c_f/2}, \qquad (4)$$

коэффициент трения:

$$c_f=\frac{0{,}455}{(\log\mathrm{Re}_L)^{2,58}}, \qquad (5)$$

число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_L=\frac{u_\infty\cdot L}{\nu}. \qquad (6)$$

где u_∞ – средняя скорость среды, м/с; L – длина пластины, м.

Значение средней безразмерной толщины пограничного слоя R_δ можно определить по следующим формулам [11], [8]:

$$R_\delta = \exp[0{,}4(u_\infty/u_*-5{,}0)], \qquad (7)$$

или

$$\delta = 0{,}205\cdot L\cdot \mathrm{Re}_L^{-0,2}, \qquad (8)$$

$$R_\delta=\frac{u_*\cdot\delta}{\nu}. \qquad (9)$$

Выражение (7) следует из логарифмического профиля скорости при $u = u_\infty$, $y = \delta$.

На основе (3) запишем число Нуссельта Nu_L для пластины:

$$Nu_L=\frac{\mathrm{Re}_L\cdot\sqrt{c_f/2}\cdot \mathrm{Pr}}{13{,}91\mathrm{Pr}^{0,66}+2{,}5\ln(R_\delta/30+0{,}14)}. \qquad (10)$$

Для проверки адекватности полученных значений чисел Нуссельта произведем их сравнение со значениями чисел Нуссельта по следующему известному уравнению:

$$\mathrm{Nu_L} = 0{,}037 \cdot \mathrm{Re_L^{0,8}} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}. \qquad (11)$$

Результаты расчета чисел Нуссельта по полученным значениям R_δ, которые были рассчитаны по (7) и (9) представлены в табл. 1 и табл. 2 соответственно. Длина пластины 1 м.

Таблица 1

Значения чисел Нуссельта в зависимости от числа $\mathrm{Re_L}$

Re	Nu по (10)	Nu по (11)	Расхождение, %
10^5	347,8	370	6
10^6	1957,4	2334,5	16,2
10^7	14791,5	14730	0,4

Таблица 2

Значения чисел Нуссельта в зависимости от числа $\mathrm{Re_L}$

Re	Nu по (10)	Nu по (11)	Расхождение, %
10^5	341,8	370	7,6
10^6	1970,2	2334,5	15,6
10^7	15138,2	14730	2,7

На основании результатов расчета чисел Нуссельта по (10) и (11) можно сделать вывод, что их значения имеют удовлетворительную сходимость от 0,4% до 16,2% при значениях средней безразмерной толщины пограничного слоя R_δ рассчитанной по (7) и от 2,7% до 15,6% при R_δ рассчитанной по (9).

Для круглой трубы с гладкими стенками при осесимметричном движении среды динамическая скорость и R_δ в уравнении (3) имеют вид:

$$u_* = u_{\text{ср}}\sqrt{\xi/8}, \qquad (12)$$

$$\mathrm{R}_\delta = \exp\left[0{,}4(u_{\text{ср}}/u_* - 5)\right], \qquad (13)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; $u_{\text{ср}}$ – средняя скорость, м/с.

Значение средней безразмерной толщины пограничного слоя R_δ можно вычислить по формуле (7) при $u_\infty = u_{\text{ср}}$. В качестве примера определим R_δ используя безразмерный профиль скорости в виде:

$$\frac{u}{u_*} = c_{(n)}\left(\frac{y \cdot u_*}{\nu}\right)^{1/n} = c_{(n)}(y^+)^{1/n}, \qquad (14)$$

где $c = 8{,}74$, $n = 7$.

На границе вязкого подслоя при $y = \delta_1$ функция, (14) имеет значение:

$$R_1 = \frac{u_*\delta_1}{\nu} = c_{(n)}\left(\frac{u_*\delta_1}{\nu}\right)^{1/n}. \qquad (15)$$

Отсюда запишем:

$$c_{(n)} = R_1^{\frac{n-1}{n}}. \qquad (16)$$

При $y = \delta$ из (15) имеем:

$$\frac{u_\infty}{u_*} = c_{(n)}\left(\frac{\delta u_*}{\nu}\right)^{1/n} = c_{(n)}R_\delta^{1/n}. \qquad (17)$$

Тогда

$$c_{(n)} = \frac{u_\infty}{u_*}\left(\frac{1}{R_\delta}\right)^{1/n}. \qquad (18)$$

В результате из (15) и (17) получим:

$$R_\delta = \frac{1}{R_1^{n-1}}\left(\frac{u_\infty}{u_*}\right)^n. \qquad (19)$$

Для пластины $u_* = u_\infty\sqrt{c_f/2}$ и тогда:

$$R_\delta = R_1^{-(n-1)}\left(\frac{1}{\sqrt{c_f/2}}\right)^n \qquad (20)$$

или

$$R_\delta = R_1^{-(n-1)}\left(\frac{2}{c_f}\right)^{n/2}. \qquad (21)$$

При $R_1 = 11{,}6$ получим ($n = 7$)

$$R_\delta = 4{,}1 \cdot 10^{-7}(c_f/2)^{-3,5}. \qquad (22)$$

Аналогично получим для трубы:

$$R_\delta = 4{,}1 \cdot 10^{-7}(\xi/8)^{-3,5}. \qquad (23)$$

Расчеты по формулам (13) и (23) дают близкие значения R_δ. Уравнение (3) для трубы в безразмерной форме запишется в виде

$$Nu_d = \frac{\mathrm{Re}\sqrt{\xi/8}\,\mathrm{Pr}}{13{,}91\mathrm{Pr}^{0,66} + 2{,}5\ln(R_\delta/R' + 0{,}14)}. \qquad (24)$$

Для сравнения результатов расчетов числа Нуссельта ($Nu_d = \alpha d/\lambda$) по (24) использовалась известная формула для трубы:

$$Nu_d = 0{,}023\mathrm{Re}^{0,8}\mathrm{Pr}^{0,43}, \qquad (25)$$

а также уравнение Петухова:

$$Nu_d = \frac{(\xi/8)\cdot\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}}{k_1 + k_2\sqrt{\xi/8}\cdot(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1)}, \qquad (26)$$

где $k_1 = 1 + 3{,}4\xi$; $k_2 = 11{,}7 + 1{,}8\mathrm{Pr}^{-1/3}$, ξ – по формуле Блазиуса:

$$\xi = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0,25}}, \; (10^4 < \mathrm{Re} < 10^5). \qquad (27)$$

Значения чисел Нуссельта представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса (Pr = 5)

Re	Nu по (24)	Nu по (25)	Nu по (26)	Расхождение, %
10^4	72,5	72,8	74,6	2,8
$2\cdot10^4$	128,4	126,8	132,7	4,45
$4\cdot10^4$	227,9	220,8	235,7	6,3
$5\cdot10^4$	274,1	263,9	283,4	6,9
$6\cdot10^4$	319	305,4	329,4	7,3
$8\cdot10^4$	405	384,4	417,4	7,9

В выражении (24) можно ввести известный множитель $(Pr/Pr_{ст})^{0,25}$, который учитывает зависимость физических свойств жидкости от температуры и влияние направления теплового потока.

Теплоотдача для поверхностей с элементами интенсификации

Следует отметить, что выражения для чисел Нуссельта, аналогичные (10) и (24) были получены различными авторами еще 1950–70 гг., поэтому определение коэффициентов теплоотдачи для пластины и трубы с гладкой поверхностью не имеет особой новизны. Значительно более сложной задачей является определение теоретическим путем коэффициентов теплоотдачи для поверхностей с элементами интенсификации (шероховатость, выступы, кольцевые накатки, закрутка и т.д.). В настоящее время для этого используются в основном различные полуэмпирические подходы.

Рассмотрим применение выражения (3) для закрученного потока при стационарном режиме.

Среднее значение динамической скорости в закрученном потоке следует из условия баланса сил в канале:

$$u_* = u_{ср}\sqrt{\xi_з/(8\cos)\theta}\,, \qquad (28)$$

где $u_{ср}$ – средняя скорость в канале, м/с; θ – угол закрутки потока; $\xi_з$ – коэффициент сопротивления потока с закруткой.

В пограничном слое с возмущениями (интенсификаций) параметры уравнения (3) имеют вид [8, 9]:

$$k_з = k\sqrt{\frac{\xi}{\xi_з}};\quad R_з' = 30\sqrt{\frac{\xi}{\xi_з}};$$

$$R_\delta' = R_\delta\sqrt{\frac{\xi}{\xi_з}}\,. \qquad (29)$$

где ξ – коэффициент сопротивления для осесимметричного потока, вычисляется по известному выражению, например (27). Запишем выражение (3) в более удобном для расчетов виде. Используя значения (28), (29), получим число Нуссельта:

$$Nu_з = \frac{\mathrm{Re}\sqrt{\xi_з/(8\cos)\,\theta}\,\mathrm{Pr}}{13{,}91\mathrm{Pr}^{0{,}66}\sqrt{\dfrac{\xi}{\xi_з}} + 2{,}5\ln(R_\delta/R' + 0{,}14)}. \qquad (30)$$

Аналогично запишем число Стантона $St_з = \left(\dfrac{\alpha}{\rho c_p u_{ср}}\right)$ для канала с закруткой:

$$St_з = \frac{\sqrt{\xi_з/(8\cos)\theta}}{13{,}91\mathrm{Pr}^{0{,}66}\sqrt{\xi/\xi_з} + 2{,}5\ln(R_\delta/R' + 0{,}14)}. \qquad (31)$$

Полученные выражения также можно использовать для приближенных расчетов коэффициентов теплоотдачи в каналах с шероховатой поверхностью. Динамическая скорость в каналах с шероховатой поверхностью примерно равна

$$u_* = u_\infty\sqrt{\xi_ш/8} = u_\infty\sqrt{c_{fш}/2},$$

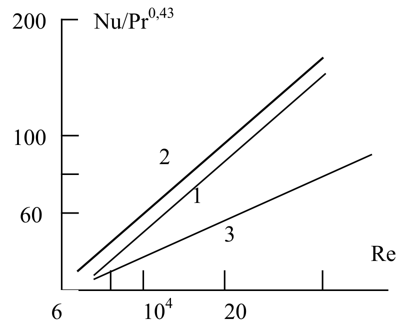
где $\xi_ш$, $c_{fш}$ – коэффициенты гидравлического сопротивления и трения с учетом шероховатости. Известно, что в режиме максимального проявления шероховатости наступает автомодельный режим и $\xi_ш \approx 0{,}08$.

Число Стантона для канала с шероховатой стенкой запишется в виде:

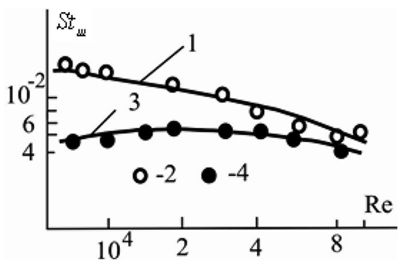
$$St_ш = \frac{\sqrt{\xi_ш/8}}{13{,}91\mathrm{Pr}^{0{,}66}\sqrt{\xi/\xi_ш} + 2{,}5\ln(R_\delta/R' + 0{,}14)}. \qquad (32)$$

Результаты расчетов

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления закрученных потоков в работах [1, 2, 7, 11] представлены различные выражения и графики. На рис. 1 даны результаты расчета числа Нуссельта (30) и сравнение с обобщенными опытными данными для закрученного потока [11] Расхождение в пределах 10 %. Также удовлетворительное согласование (± 15 %) получено с экспериментальными данными, приведенными в работе [2].



а)



б)

Рис. 1. а) зависимость комплекса $Nu/Pr^{0,43}$ от числа Re в канале с ленточным завихрителем: 1 – расчет по уравнению (30); 2 – экспериментальные данные; 3 – для осевого потока; б) результаты расчета и опытные данные по теплоотдаче в канале с шероховатыми стенками 1,3 – расчет по уравнению (32), 2,4 –экспериментальные данные [4]

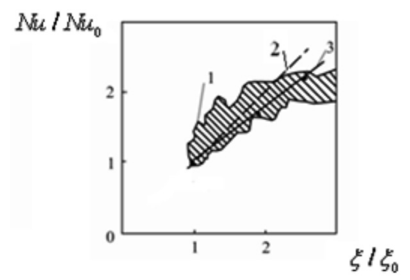


Рис. 2. Эффективность интенсификации теплообмена в круглом канале [2], [9]: 1 – область, занимаемая экспериментальными точками, 2 – при $Nu/Nu_0 = \xi/\xi_0$, 3 – расчет по формуле (30)

На рис. 2 представлена зависимость Nu/Nu_0 от ξ/ξ_0 для различных способов интенсификации теплообмена в каналах и результаты расчета с использованием формулы (30), где Nu_0, ξ_0 для каналов без интенсификации. Из рис. 2 следует, что рекомендуемое многими авторами отношение $Nu/Nu_0 = \xi/\xi_0$ справедливо до значения $\xi/\xi_0 \le (1,5 \div 2)$. При $\xi/\xi_0 > 2$ начинается опережающий рост гидравлического сопротивления по сравнению с теплоотдачей.

Выводы

На основе применения модели турбулентного пограничного слоя получено выражение для расчета среднего значения коэффициента теплоотдачи. Выполнена последовательная проверка данного выражения для случаев теплоотдачи от пластины, в трубе, а также в каналах с закруткой потока и шероховатой стенкой. При переходе к потокам с возмущениями выполняется корректировка параметров уравнения в виде отношения коэффициентов гидравлического сопротивления.

Полученные выражения для чисел Нуссельта и Стантона рекомендуется для практического применения при расчетах теплообменных аппаратов.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (Задание № 13.405.2014/К).

Список литературы

1. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Кутепов А.М. и др. Интенсификация тепло- и массообмена в энергетике. – М.: ФГУП «ЦНИИАТОМ-ИНФОРМ», 2003. – 232 с.

2. Дзюбенко Б.В., Мякочин А.С., Щербакова Н.У. Тепломассообмен в каналах с закруткой потока // Сборник научных статей «Современная наука». – 2011. – № 2(7). – С. 17–22.

3. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1993. – 438 с.

4. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

5. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. – Новосибирск: Наука, 1982. – 280 с.

6. Кутутеладзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.

7. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидромеханическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоиздат, 1990. – 367 с.

8. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. – 500 с.

9. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учебно-справочное пособие. – М.: «Теплотехник», 2011. – 335 с.

10. Разаев А.М., Филатов Л.Л. Теплопередача и гидравлическое сопротивление воды в трубах со спиральными канавками // Теплоэнергетика, 1986. – № 1. – С. 44–46.

11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Пер. Вольперта Г.А. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1974. – 711 с.