

© В.Я. ГУБАРЕВ, А.Г. АРЗАМАСЦЕВ

Липецкий государственный технический университет
gv_lipetsk@rambler.ru, arzamastcev-ag@mail.ru

УДК 536.24

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ БЕЗОТРЫВНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ОБТЕКАНИИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ТОНКОДИСПЕРСНЫМИ ДВУХФАЗНЫМИ ПОТОКАМИ**

**HEAT TRANSFER CALCULATION FOR STEADY TURBULENT
FLOW OF HIGH-TEMPERATURE SURFACES
IN FINELY DISPERSED TWO-PHASE FLOWS**

В работе рассмотрен теплообмен при безотрывном турбулентном обтекании тонкодисперсными двухфазными потоками высокотемпературных поверхностей до начала испарения капель. Проанализировано влияние капельной фазы на интенсивность процессов теплообмена. Введен коэффициент интенсификации теплообмена и найден общий вид зависимости этого коэффициента от параметров потока. Приведены результаты расчетов коэффициента интенсификации теплообмена для продольного обтекания и течения в цилиндрическом канале. Получен общий вид критериальных уравнений для нахождения коэффициента теплоотдачи при турбулентном безотрывном обтекании различных геометрических поверхностей.

The article considers the research on the heat transfer in steady turbulent flow in finely dispersed two-phase flows of high-temperature surfaces prior to the droplet evaporation. The impact of the droplet phase on the intensity of heat transfer processes is analyzed. The paper suggests the coefficient of heat exchange intensification and the general dependency of this ratio on the flow parameters. It is also calculated the heat transfer intensification coefficient for the longitudinal flow and the flow in a cylindrical channel. It is provided the general criterial equations to calculate the heat transfer coefficient for steady turbulent flow over surfaces of various geometry.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Коэффициент теплоотдачи, двухфазный тонкодисперсный поток, турбулентное обтекание, коэффициент интенсификации теплообмена.

KEY WORDS. The coefficient of heat transfer, two-phase dispersed flow, turbulent flow, the coefficient of heat exchange intensification.

В настоящее время проблема охлаждения высоконагретых поверхностей относится к одному из приоритетных направлений в энергетике и металлургии. Выбор в качестве охладителя двухфазного потока может позволить существенно увеличить интенсивность процессов теплообмена. Несмотря на большое

количество экспериментальных и расчетных работ, посвященных теплообмену в газожидкостной среде, отсутствуют аналитические зависимости, учитывающие влияние параметров потока на интенсивность теплообмена. Экспериментальные работы по данной теме [1-8] посвящены частному случаю теплообмена для поверхности определенной геометрической формы при заданном режиме течения. Только теоретическое исследование с последующим получением критериальных уравнений позволяет дать обобщающую оценку влияния различных факторов на процесс теплообмена между охлаждаемой поверхностью и двухфазным потоком.

Теплообмен при турбулентном безотрывном обтекании. В данной работе рассмотрены принципы расчета теплообмена при турбулентном безотрывном обтекании двухфазным тонкодисперсным потоком высокотемпературной поверхности. Поток характеризуется следующими параметрами: влагосодержание потока d (масса жидкости, отнесенная к массе содержащего ее газа), средний диаметр каплей d_k , давление P , скорость потока w_0 . Температура поверхности $t_{ст}$ превышает температуру Лейденфроста, что означает отсутствие непосредственного контакта охлаждаемой поверхности с жидкокапельной компонентой потока. Все расчеты проводились только для конвективного теплообмена, без учета влияния излучения. Для расчетов использовалась односкоростная гомогенная модель течения, при которой движение тонкодисперсного газожидкостного потока описывается обычными дифференциальными уравнениями течения гомогенной жидкости с использованием эквивалентных параметров двухфазной смеси [9]. Капли рассматривались как внутренние отрицательные источники тепла. В работе [10] показано, что при прогреве каплей до температуры насыщения реализуется квазистационарный процесс теплопроводности, в этом случае можно принять температуру каплей постоянной и равной температуре газа в ядре турбулентного потока: $t_k = t_0$.

Принятые допущения позволили свести задачу теплообмена к решению дифференциального уравнения теплопроводности с внутренними отрицательными источниками тепла:

$$\nabla^2 \mathcal{G} - b^2 \cdot \mathcal{G} = 0, \quad (1)$$

где $b = \frac{3,46}{d_k} \cdot \left(\frac{\rho_r \cdot d}{\rho_k} \right)^{0,5}$ — параметр, характеризующий внутренние источники тепла, m^{-1} ; \mathcal{G} — температурный напор между газовой и капельной фазами, $^{\circ}C$; ρ_r, ρ_k — плотность газа и капли соответственно, kg/m^3 .

Решение уравнения (1) с учетом температурного напора у стенки \mathcal{G}_0 будет иметь вид:

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_0 \cdot f(b \cdot x) = f(\bar{x}), \quad (2)$$

где x — характерный размер, m ; $\bar{x} = b \cdot x$ — безразмерный параметр.

Введем коэффициент: $n = -\frac{df}{d\bar{x}}$.

В этом случае тепловой поток к жидкой фазе: $q_k = \lambda_r \cdot b \cdot n \cdot (t_n - t_k)$.

При турбулентном течении у стенки образуется вязкий гидродинамический чисто газовый ламинарный подслой, создающий основное термическое сопро-

тивление и определяющий интенсивность теплообмена. Толщину теплового подслоя в дальнейшем считаем равной толщине гидродинамического вязкого ламинарного подслоя: $\delta_{\Gamma} = \delta_{\text{л.п.}}$.

Для расчета коэффициента теплоотдачи от поверхности к двухфазному потоку применим известный подход, основанный на использовании интегральных уравнений теплового потока и импульса для пограничного слоя, дополнив его учетом теплопереноса к капельной компоненте [11].

На внешней границе теплового подслоя общий тепловой поток от стенки $q_{\text{п}}$ отводится как турбулентным переносом газовой фазы q_{Γ} , так и к жидкой фазе $q_{\text{к}}$ за счет разрыва температур между газовой и капельной компонентами потока. Тогда:

$$q_{\text{п}} = q_{\Gamma} + q_{\text{к}}. \quad (3)$$

$$\text{Тепловой поток при турбулентном переносе: } q_{\Gamma} = s \cdot \frac{\lambda_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}} \cdot \frac{t_{\text{п}} - t_0}{w_0 - w_{\text{п}}},$$

где s — касательное напряжение на границе вязкого подслоя, Па; $t_{\text{п}}$, t_0 — значения температур на границе подслоя и за его пределами соответственно, °С; $w_{\text{п}}$, w_0 — скорости на границе подслоя и за его пределами соответственно, м/с.

Касательное напряжение на границе вязкого подслоя будет:

$$s = C_1 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_0^2 \cdot \text{Re}^{-0,2}, \quad (4)$$

где $C_1 = \text{const}$ определяется только геометрическим типом поверхности. В пределах вязкого подслоя принимается линейное распределение скоростей:

$$w_y = w^* \cdot y^*, \quad (5)$$

где $w^* = \sqrt{\frac{s}{\rho_{\Gamma}}} = \sqrt{C_1} \cdot w_0 \cdot \text{Re}^{-0,1}$; y^* — продольная координата, м. Для границы вязкого подслоя и двухфазной турбулентной части пограничного слоя, согласно [11]: $y^* = C_2$, где $C_2 = \text{const}$ определяется только геометрическим типом поверхности. Скорость на границе вязкого ламинарного подслоя и двухфазной турбулентной части пограничного слоя:

$$w_{\text{л.п.}} = \sqrt{\frac{s}{\rho_{\Gamma}}} \cdot y^* = \sqrt{C_1} \cdot C_2 \cdot \text{Re}^{-0,1} \cdot w_0. \quad (6)$$

Толщина ламинарного вязкого подслоя согласно [11]:

$$\delta_{\text{л.п.}} = C_2 \cdot \nu_{\Gamma} \cdot \left(\frac{s}{\rho_{\Gamma}} \right)^{-0,5}. \quad (7)$$

При расчетах учитываем, что тепловой поток через подслои равен тепловому потоку с теплоотдачей: $q_{\text{п}} = \alpha \cdot \mathcal{G}_0$.

Введем коэффициент ε — отношение теплового потока к капельной фазе к тепловому потоку при турбулентном переносе:

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{к}}}{q_{\Gamma}} = \frac{1}{C_1} \cdot \bar{x} \cdot n \cdot \frac{\text{Re}^{0,2} - \sqrt{C_1} \cdot C_2 \cdot \text{Re}^{0,1}}{\text{Re}}. \quad (8)$$

Тогда критериальное уравнение для нахождения коэффициента теплоотдачи при течении двухфазного потока, без учета поправок на температурный фактор, будет иметь вид:

$$Nu_{\text{двухф}} = C_1 \cdot Re^{0,8} \cdot \frac{1 + \varepsilon}{1 + \sqrt{C_1} \cdot C_2 \cdot Re^{-0,1} \cdot \varepsilon}. \quad (9)$$

Представим критериальное уравнение (9) для двухфазного потока в виде:

$$Nu_{\text{двухф}} = Nu_{\text{г}} \cdot \beta = C_1 \cdot Re^{0,8} \cdot \beta, \quad (10)$$

где β — коэффициент интенсификации теплообмена, равный отношению между коэффициентами теплоотдачи при течении двухфазного и газового однофазного потоков:

$$\beta = \frac{1 + \varepsilon}{1 + \sqrt{C_1} \cdot C_2 \cdot Re^{-0,1} \cdot \varepsilon}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что при $Re = const$ с возрастанием теплового потока к жидкой фазе коэффициент интенсификации β будет увеличиваться. При доминирующем влиянии на процесс теплообмена капельной фазы, что соответствует $\varepsilon \rightarrow \infty$, максимальное значение β будет равно: $\beta_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{C_1} \cdot C_2} \cdot Re^{0,1}$, а максимальное значение коэффициента теплоотдачи прямо пропорционально $Re^{0,9}$.

На рис. 1 приведен график зависимости коэффициента β от влагосодержания при продольном обтекании плоской поверхности для характерной координаты $x = 0,25 \text{ м}$, при скорости потока $w = 30 \text{ м/с}$.

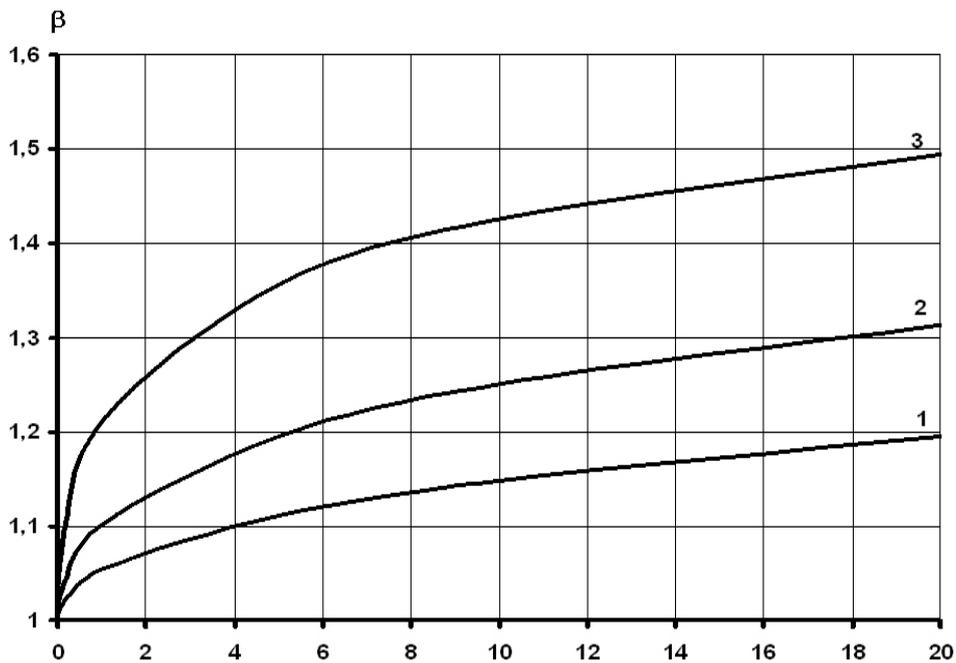


Рис. 1. Зависимость коэффициента β от влагосодержания:
1- $d_k = 100 \text{ мкм}$, 2- $d_k = 50 \text{ мкм}$, 3- $d_k = 20 \text{ мкм}$

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента β от влагосодержания для течения в цилиндрическом канале диаметром $d_{\text{кан}} = 6 \text{ мм}$ при значении $Re = 10^5$.

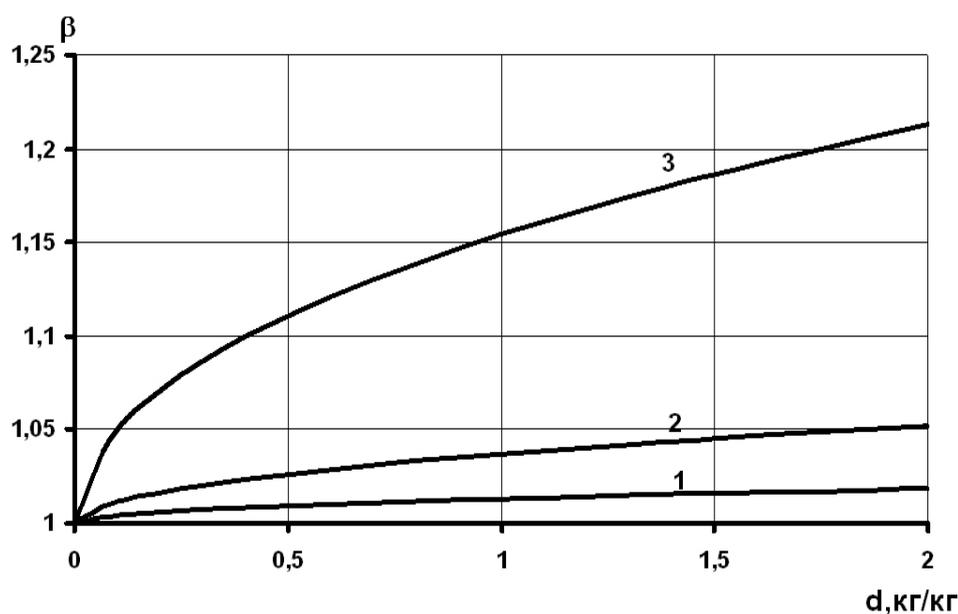


Рис. 2. Зависимость коэффициента β от влагосодержания:
1 — $P = 5 \text{ атм}$, $d_k = 100 \text{ мкм}$; 2 — $P = 10 \text{ атм}$, $d_k = 50 \text{ мкм}$; 3 — $P = 30 \text{ атм}$, $d_k = 20 \text{ мкм}$

Анализируя полученные выше зависимости для нахождения коэффициента теплоотдачи, можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена при турбулентном обтекании двухфазным тонкодисперсным потоком высокотемпературной поверхности, является толщина вязкого ламинарного подслоя. Именно толщина подслоя ограничивает максимальное значение коэффициента интенсификации теплообмена β .

Выводы. В работе с учетом влияния на процесс теплообмена капельной фазы получен общий вид критериальных уравнений по определению коэффициента теплоотдачи для турбулентного безотрывного обтекания двухфазными тонкодисперсными потоками высокотемпературных поверхностей различных геометрических форм. Показано, что при безотрывном обтекании критериальные уравнения теплообмена для различных поверхностей отличаются лишь значениями характерных констант.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадер В.И. Исследование теплообмена при охлаждении полого горизонтального цилиндрического слитка двухфазной веерной струей // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 4. С. 75-76.

2. Есаулов В.А. Моделирование процесса теплообмена при водовоздушном охлаждении непрерывнолитой заготовки // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 8. С. 82-85.
3. Акименко А.Д. Исследование теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения УНРС // Известия вузов. Черная металлургия. 1972. № 6. С. 167-170.
4. Кабаков З.К. Исследование условий теплообмена в зоне вторичного охлаждения УНРС // Известия вузов. Черная металлургия. 1977. № 11. С. 184-187.
5. Траянов Г.Г. Стендовые исследования охлаждения толстого стального листа в роликовом закалочном устройстве. М.: Металлургическая теплотехника, 1975. № 4. С. 89-94.
6. Овчаренко М.П. Исследование параметров водовоздушного вторичного охлаждения МНЛЗ // Сталь. 1986. № 1. С. 27-29.
7. Ходжсон Т. Экспериментальное исследование теплоотдачи от изотермического цилиндра, охлаждаемого распыленной водой // Теплопередача. 1968. Т. 90, № 4. С. 96-103.
8. Исаченко В.П., Сидорова И.К. Экспериментальное исследование охлаждения плоской поверхности струей диспергированной жидкости // Теплоэнергетика. 1982. № 3. С. 30-33.
9. Губарев В.Я. Условия применимости гомогенной модели течения двухфазных газожидкостных потоков: Механика и процессы управления // Труды XXXIII Уральского семинара. 2003. С. 80-87.
10. Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 370 с.
11. Исаченко В.П. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.

REFERENCES

1. Bader, V.I. Study of heat transfer during cooling of the hollow cylindrical ingot in two-phase fan jet // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. 1991. № 4. Pp. 75-76. (in Russian).
2. Esaulov, V.A. Modeling of heat transfer at the water-air cooling of continuously cast billets // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. 1990. № 8. Pp. 82-85. (in Russian).
3. Akimenko, A.D. Study of heat transfer in the zone of secondary cooling machine // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. № 6. 1972. Pp. 167-170. (in Russian).
4. Kabakov, H.K. Study of the conditions of heat transfer in the zone of secondary cooling machine // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. 1977. № 11. Pp. 184-187. (in Russian).
5. Trayanov, G.G. Bench-top research on cooling thick steel plate in the roller-quenching device. Moscow: Metallurgical heat engineering. 1975. № 4. Pp. 89-94. (in Russian).
6. Ovcharenko, M.P. Investigation of parameters of the air / water secondary cooling of continuous casting machine // Steel. 1986. № 1. Pp. 27-29. (in Russian).
7. Hodgson, T. Experimental study of heat transfer from an isothermal cylinder, cooled spray // Heat transfer. 1968. S. 90, № 4. Pp. 96-103. (in Russian).
8. Isachenko, B.N., Sidorov I.K. An experimental study of cooling a flat surface in the dispersed liquid jet // Thermal Engineering. 1982. № 3. Pp. 30-33. (in Russian).
9. Gubarev, V.Y. Conditions of applicability of the homogeneous flow model of two-phase gas-liquid flows: Mechanics and control processes // Proceedings of the 33d Ural workshop. 2003. Pp. 80-87. (in Russian).
10. Labuntsov, D.A. Mechanics of two-phase systems. Moscow: MPEI Publishing house, 2000. 370 p. (in Russian).
11. Isachenko, B.N. Heat Transfer. Moscow: Energy, 1975. 488 p. (in Russian).

Авторы публикации

Губарев Василий Яковлевич — заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета, кандидат технических наук, профессор

Арзамасцев Алексей Геннадьевич — старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета, кандидат физико-математических наук

Authors of the publication

Vasiliy Y. Gubarev — Cand. Tech. Sci., Professor, Head of the Industrial Heat Power Engineering Department, Lipetsk State Technical University

Alexey G. Arzamastsev — Cand. Phys. and Math. Sci., Senior Lecturer, Industrial Heat Power Engineering Department, Lipetsk State Technical University