

УДК 669.04

## О РАСЧЕТЕ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТРУИ С ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Прибытков И.А., к.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (temp@isis.ru)*

*Кондрашенко С.И., ассистент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (stas.misis@yandex.ru)*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Предложена методика расчета конвективной теплоотдачи при взаимодействии одиночной круглой струи с плоской поверхностью. Показаны отличия данной методики от существующих в настоящее время. Введены понятия «энергодинамический потенциал потока» и «энергодинамическая мощность потока», позволяющие определить интенсивность конвективной теплоотдачи на границе «газ – твердое тело». Даны отличия предложенных определений от уже существующих: плотности теплового потока и теплового потока. Принципиальное отличие плотности теплового потока  $q$  и энергодинамического потенциала  $q_3$  заключается в следующем: величина плотности теплового потока  $q$  для задач конвективной теплоотдачи означает количество теплоты, которое переносится от жидкости к твердой поверхности (или наоборот) за единицу времени через единицу площади поверхности теплообмена. Таким образом, величина  $q$  характеризует интенсивность процесса конвективной теплоотдачи на границе раздела фаз. Энергодинамический потенциал  $q_3$  характеризует свойство потока как источника или носителя теплоты. Величина  $q_3$  характеризует удельную энергетическую мощность потока жидкости. При расчете теплообмена предложено разделять струю при взаимодействии ее с плоской поверхностью на две части: до взаимодействия – струйная часть, после – веерный поток. Методика расчета конвективной теплоотдачи при струйном нагреве, в которой определяющим является критерий Рейнольдса, рассчитанный по характеристикам газа на выходе из сопла, является не совсем корректной. Предлагается использовать критерии, характерные для веерного потока. Данными величинами для веерного потока являются начальная средняя скорость веерного потока  $U_{вп}$ , расстояние от критической точки струи (точка пересечения вертикальной оси струи с поверхностью) до текущей координаты радиуса вниз по течению. Для оценки изменения основных характеристик свободной струи при различных расстояниях от среза сопла до ограничивающей поверхности представлены зависимости: коэффициента расширения струи; коэффициента инжекции струи; коэффициента скорости для любого сечения струи; коэффициента скорости для любого сечения струи, кроме  $h/d_0 = 0$ ; отношения критериев Рейнольдса, подтверждающие необходимость проведения расчетов теплообмена по величинам, характерным отдельно для веерного потока.

**Ключевые слова:** струйный нагрев, «атакующие» струи, веерный поток, конвективный теплообмен, численное моделирование, конвективная теплоотдача, поля скоростей, энергодинамический потенциал, энергодинамическая мощность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-208-214

Из достаточно большого перечня схем струйного конвективного нагрева можно выделить нагрев атакующими (ударными) струями [1 – 12], особенностью которого является выраженная направленность высокотемпературных и высокоскоростных струй на поверхность нагреваемого металла. В этом случае струи теплоносителя могут выполнять также роль турбулизатора потока греющих газов, движущихся параллельно поверхности.

Одной из особенностей движения струи после ее взаимодействия с ограничивающей поверхностью является существенное изменение ее характеристик. Струя теряет изначальную форму и у поверхности теплообмена формируется веерный поток. Структура и режим течения газа внутри веерного потока и его тепловое состояние определяют интенсивность конвективной теплоотдачи на границе «газ – твердое тело».

Имеющиеся в литературе [13 – 18] расчетные формулы для определения интенсивности конвективной

теплоотдачи включают в качестве определяющих величин такие, как внутренний диаметр сопла, начальную скорость истечения газа на срезе сопла, относительную высоту расположения сопел или отверстий над ограничивающей поверхностью, шаг между осями сопел. В то же время веерный поток имеет отличные от струйного потока форму, аэродинамические свойства и тепловое состояние. Потеря струей своей индивидуальности после контакта с ограничивающей поверхностью требует другого подхода к расчетам аэродинамики и теплообмена при струйном нагреве.

Поток газа (например, продуктов сгорания топлива или любая греющая среда), имеющий температуру и скорость, обладает определенным энергодинамическим потенциалом  $q_3$ , Вт/м<sup>2</sup>, который можно рассчитать по формуле

$$q_3 = U_{cp} c_{cp} T_{cp}, \quad (1)$$

где  $U_{cp}$  – средняя по сечению потока скорость, м/с;  $T_{cp}$  – средняя по сечению потока температура жидкости или газа, °С;  $c_{cp}$  – средняя по сечению потока удельная теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>·К.

Энергодинамический потенциал газового потока имеет размерность плотности теплового потока и представляет собой количество теплоты, переносимой в единицу времени через единицу площади поперечного сечения потока.

Принципиальное отличие понятий плотности теплового потока  $q$  и энергодинамического потенциала  $q_3$  заключается в следующем. Величина плотности теплового потока  $q$  для задач конвективной теплоотдачи означает количество теплоты, которое переносится от жидкости к твердой поверхности (или наоборот) за единицу времени через единицу площади поверхности теплообмена. Таким образом, величина  $q$  характеризует интенсивность процесса конвективной теплоотдачи на границе раздела фаз. Энергодинамический потенциал  $q_3$  определяет свойство потока как источника или носителя теплоты. Величина  $q_3$  характеризует удельную энергетическую мощность потока жидкости.

Наряду с понятием «энергодинамический потенциал потока» введем понятие энергетической мощности потока  $Q_3$ , Вт:

$$Q_3 = q_3 S, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения потока.

На рис. 1 показан случай движения жидкости или газа внутри трубы круглого поперечного сечения с внутренним диаметром  $d$ .

Энергетическая мощность потока в сечениях  $1-1$  и  $2-2$  соответственно равна

$$Q_{31} = U_{cp1} c_{cp1} T_{cp1} S_1; \quad (3)$$

$$Q_{32} = U_{cp2} c_{cp2} T_{cp2} S_2, \quad (4)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – соответственно площади поперечных сечений  $1-1$  и  $2-2$ .

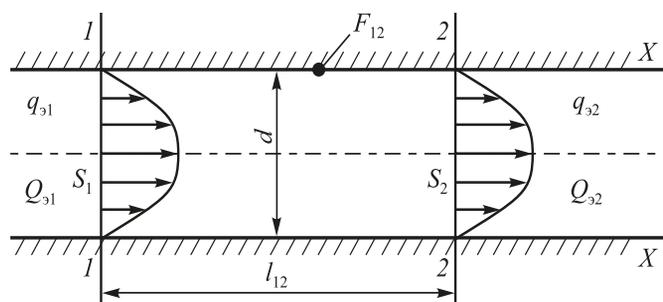


Рис. 1. Движение жидкости или газа внутри трубы круглого поперечного сечения

Fig. 1. Movement of a liquid or gas inside the pipe of circular cross section

Разность энергетических мощностей  $\Delta Q_3 = Q_{31} - Q_{32}$  представляет собой результат теплообмена между жидкостью и поверхностью на пути  $l_{12}$ .

Используя величину  $\Delta Q_3$ , Вт, можно записать:

$$\Delta Q_3 = q_{конв} F_{12}, \quad (5)$$

где  $q_{конв}$  – средняя величина плотности теплового потока конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{12}$  – площадь теплообменной поверхности, в данном случае  $F_{12} = \pi d l_{12}$ .

Тогда

$$q_{конв} = \frac{\Delta Q_3}{F_{12}}. \quad (6)$$

При наличии между сечениями  $1$  и  $2$  источников (стоков) теплоты, последние должны быть учтены при расчете величины  $\Delta Q_3$ .

Ниже рассматривается применение предложенного метода к случаю взаимодействия струи с поверхностью.

Принимается, что весь поток состоит из трех участков. Его схема представлена на рис. 2:

- область струйного течения между сечениями  $0-0$  и  $1-1$ ;
- переходная область течения (участок формирования вверного потока) между сечениями  $1-1$  и  $2-2$ ;
- область установившегося вверного потока между сечениями  $2-2$  и  $3-3$ .

На участке от сечения  $0-0$  до сечения  $1-1$  протекают процессы инжекции окружающей газовой среды в струю, изменения профиля начальной скорости и профиля начальной температуры и изменения удельной теплоемкости движущейся среды. На этом участке струйного течения работают законы развития свободной струи. Энергодинамический потенциал и энергетическая мощность струи на срезе сопла описываются соотношениями

$$q_{3,o} = U_o c_o T_o; \quad (7)$$

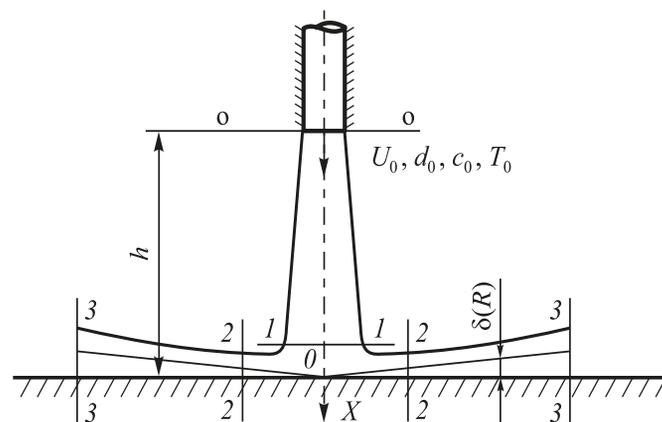


Рис. 2. Расчетная схема потока при ударе струи о плоскую поверхность

Fig. 2. Calculated flow pattern when the jet hits a flat surface

$$Q_{3,0} = U_0 c_0 T_0 S_0. \quad (8)$$

В области между сечениями 1-1 и 2-2 идет перестройка струйного потока в веерный, который аналогичен потоку с канальным течением. В этой области начинает формироваться пристеночный пограничный слой  $\delta(R)$  переменной толщины. Режим движения газа в этом слое и структура его определяют интенсивность конвективной теплоотдачи на границе раздела «газ – твердая поверхность».

Энергодинамический потенциал смеси газов рассчитывается с учетом энергодинамического потенциала каждого газа в отдельности  $q_{3,i}$  и доли этого газа в смеси  $m_i$ :

$$q_{3,см} = \sum_{i=1}^n q_{3,i} m_i, \quad (9)$$

где  $m_i$  – доля соответствующего газа в смеси или  $q_{3,см} = q_{3,CO_2} m_{CO_2} + q_{3,H_2O} m_{H_2O} + q_{3,N_2} m_{N_2} + \dots$ , при этом  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ .

Расчет параметров струйной части потока проводится в предположении, что струя до встречи с поверхностью является свободной. Как известно [16, 19, 20], свободная струя по мере удаления от среза сопла расширяется вследствие вовлечения в движение окружающей неподвижной среды. Изменение радиуса  $R(x)$  струи описывается выражением [16, 19]

$$R(x) = r_0 \left( 0,44 \frac{h}{d_0} - 0,17 \right). \quad (10)$$

По мере развития струи по ее длине объемный расход через поперечное сечение возрастает и это изменение определяется уравнением

$$V_1 \equiv V(x) = V_0 \left( 0,332 \frac{h}{d_0} \right) + 0,623, \quad (11)$$

где  $d_0$  и  $V_0$  – соответственно внутренний диаметр сопла и первоначальный объемный расход вытекающего газа на срезе сопла.

Соотношение между скоростью газа (для каждого сечения основного участка струи) на расстоянии  $r$  от оси струи и максимальной скоростью на оси струи определяется формулой Шлихтинга [16, 19]:

$$\frac{U(r)}{U_{max}} = 10,22 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{3/2} \right]^2. \quad (12)$$

В каждом сечении величина  $r$  меняется от 0 до  $R(x)$ .

По мере увеличения координаты  $x$  максимальная скорость на оси уменьшается (кроме начального участка) по закону [15, 16]

$$U_{max} = U_0 \left( \frac{10,21}{2 \frac{h}{d_0} + 0,57} \right). \quad (13)$$

Контакт струи с непроницаемой поверхностью приводит к резкой деформации струи, формированию веерного потока с соответствующим профилем скорости в поперечном сечении и его изменением в радиальном направлении. В веерной части потока необходимо рассчитать его начальную толщину  $l_1$  и среднюю начальную скорость течения.

Средняя скорость через сечение 1-1:

$$\bar{U}_1 = \frac{V_1}{S_1} = \frac{V_1}{\pi R_1^2}, \text{ м/с.} \quad (14)$$

Массовый расход через сечение 1-1:

$$M_1 = \rho_1 V_1, \text{ кг/с.} \quad (15)$$

Массовый расход через сечение 2-2:

$$M_2 = \rho_2 V_2, \text{ кг/с.} \quad (16)$$

Величины  $\rho_1$  и  $\rho_2$  представляют собой средние плотности газа в соответствующих сечениях.

Согласно закону сохранения массы

$$\begin{aligned} M_1 &= M_2; \\ \rho_1 V_1 &= \rho_2 V_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая, что  $\rho_1 = \rho_2$ , получим, что  $V_1 = V_2$ . Поскольку  $V_2 = \bar{U}_{вп} S_{вп}$ , получим  $\bar{U}_{вп} S_{вп} = \bar{U}_1 S_1$ . Учитывая, что  $S_{вп} = l_1 2\pi R_1$  и принимая  $\bar{U}_{вп} = \bar{U}_1$ , имеем выражение  $S_1 = l_1 2\pi R_1$ , откуда начальная толщина веерного потока равна

$$l_1 = \frac{\pi R_1^2}{2\pi R_1} = \frac{R_1}{2}. \quad (18)$$

Соотношение энергодинамических потенциалов веерного потока и струи на срезе сопла представляет собой суммарный коэффициент затухания энергодинамического потенциала струи:

$$k_3 = \frac{U_{вп}^{нач} c_{вп}^{нач} T_{сп}}{U_0 c_0 T_0} = \frac{U_{вп}^{нач} i_{вп}^{нач}}{U_0 i_0} = k_U k_i,$$

где  $k_U$  – коэффициент затухания средней по сечению начальной скорости струи;  $k_i$  – коэффициент затухания начальной энтальпии струи.

Величина  $k_U$  для одиночной струи определяется такими факторами, как  $U_0$ , температура вытекающего из сопла газа, температура среды, в которую струя втекает, геометрия системы «струя – ограничивающая поверхность». Коэффициент  $k_i$  показывает изменение тепло-

вого состояния газового потока на пути развития струйной части потока.

Суммарный коэффициент затухания энергодинамического потенциала, как и частные коэффициенты  $k_U$  и  $k_I$ , характеризует степень изменения энергодинамического потенциала на пути от начала струи до момента формирования веерного потока. Его величина учитывает как аэродинамические, так и теплообменные процессы на участке струйного течения.

На рис. 3 представлены результаты расчета изменения максимальной скорости на оси струи  $U_{\max}$  на основном участке и начальной средней по сечению скорости веерного потока  $U_{\text{вп}}^{\text{нач}}$  в зависимости от расстояния  $h/d_0$  ( $d_0 = 0,01$  м, температура истекающего из сопла азота  $700$  °С,  $U_0 = 30$  м/с). Видно, что наибольшая разность указанных скоростей наблюдается в начале основного участка при  $h/d_0 = 5$ . С увеличением относительного расстояния указанная разность уменьшается, причем область значимого изменения наблюдается при  $h/d_0 \leq 15$ .

Величина гидравлического диаметра начального сечения веерного потока определяется в соответствии со смыслом этого термина по уравнению

$$d_{\text{вп}}^r = \frac{4S}{\Pi}, \quad (19)$$

где  $S$  – начальная площадь сечения веерного потока;  $\Pi$  – периметр начального сечения веерного потока.

Учитывая, что  $S = 2\pi Rl$ ,  $\Pi = 2\pi R \cdot 2 + 2l$  или  $\Pi = 4\pi R + 2l$  (величина  $R$  определяется соотношением  $h/d_0$ ). Из этого следует, что

$$d_{\text{вп}}^r = \frac{4 \cdot 2\pi Rl}{4\pi R + 2l} = \frac{8\pi Rl}{2(2\pi R + l)} = \frac{4\pi Rl}{2\pi R + l}. \quad (20)$$

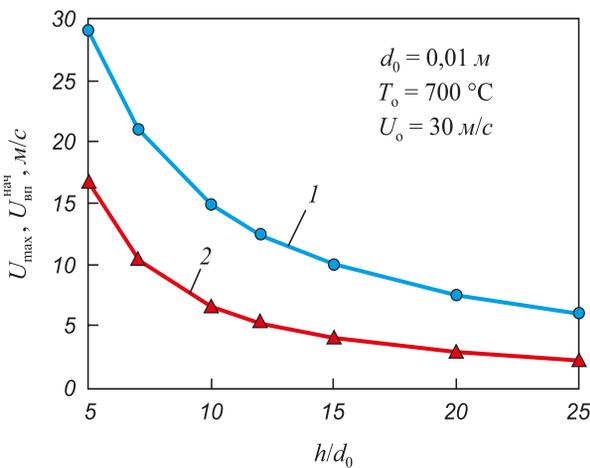


Рис. 3. Изменение максимальной скорости на оси струи  $U_{\max}$  (1) на основном участке и начальной средней по сечению скорости веерного потока  $U_{\text{вп}}^{\text{нач}}$  (2) в зависимости от расстояния  $h/d_0$ .

Fig. 3. Change in maximum velocity on jet axis  $U_{\max}$  (1) on the main plot and the initial average velocity over the cross section of the of the fan flow  $U_{\text{вп}}^{\text{нач}}$  (2) depending on the distance  $h/d_0$ .

Зависимость гидравлического диаметра начального сечения веерного потока от величины  $h/d_0$  (при вышеуказанных условиях) показана на рис. 4. Данная зависимость носит линейный характер.

Для оценки изменения основных характеристик свободной струи при различных расстояниях от среза сопла до ограничивающей поверхности  $h/d_0$  на рис. 5 приведены зависимости:

– коэффициента расширения струи

$$k_R = 0,44 \frac{h}{d_0} - 0,17, \quad (21)$$

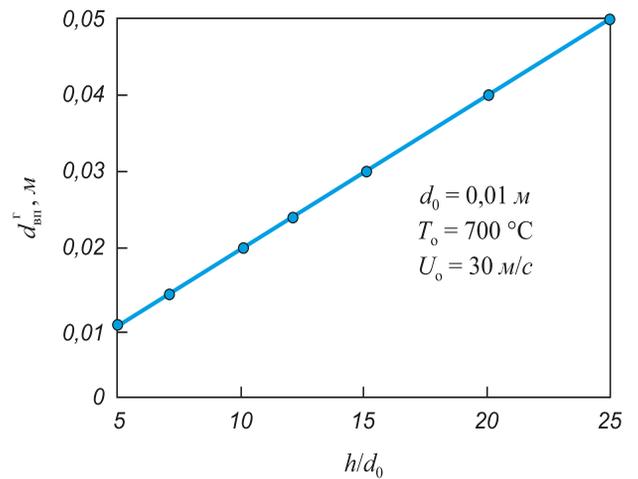


Рис. 4. Изменение начального гидравлического диаметра сечения веерного потока по высоте струйной части потока

Fig. 4. Change of initial hydraulic diameter of fan flow section along height of the flow jet part

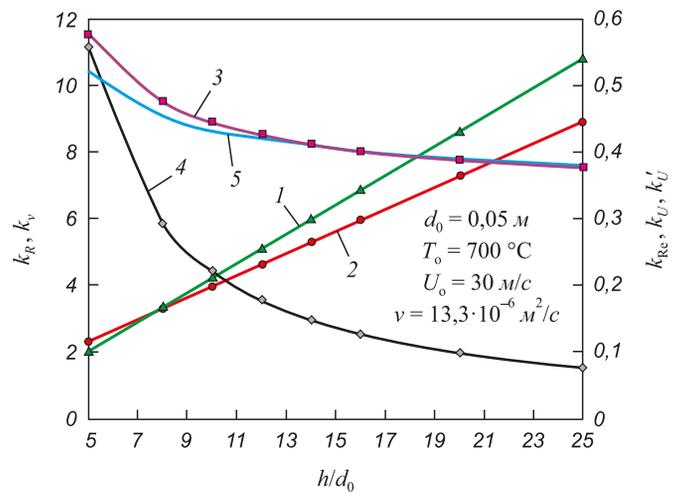


Рис. 5. Зависимость отношения коэффициентов расширения струи  $k_R$  (1), инжекции струи  $k_V$  (2), скорости для любого сечения  $k_U$  (3), скорости для любого сечения, кроме  $h/d_0 = 0$ ,  $k'_U$  (4), критериев Рейнольдса  $k_{Re}$  (5) от  $h/d_0$

Fig. 5. Dependence of the ratio of expansion coefficients of the jet  $k_R$  (1), jet injection  $k_V$  (2), velocity for any section  $k_U$  (3); velocity for any section except  $h/d_0 = 0$ ,  $k'_U$  (4) and Reynolds criteria  $k_{Re}$  (5) from  $h/d_0$

где  $h$  – заданное расстояния от среза сопла до поверхности;

– коэффициента инжекции струи

$$k_V = 0,332 \frac{h}{d_0} + 0,623; \quad (22)$$

– коэффициента скорости для любого сечения струи

$$k_U = \frac{U_{\text{вп}}^{\text{нач}}}{U_{\text{max}}}; \quad (23)$$

– коэффициента скорости для любого сечения струи, кроме  $h/d_0 = 0$

$$k'_U = \frac{U_{\text{вп}}^{\text{нач}}}{U_0}, \quad (24)$$

где  $U_{\text{max}}$  – скорость на оси струи для любого сечения струи;

– отношения критериев Рейнольдса

$$k_{\text{Re}} = \frac{\text{Re}_{\text{вп}}}{\text{Re}_0}, \quad (24)$$

где  $\text{Re}_{\text{вп}} = \frac{U_{\text{вп}}^{\text{нач}} d_{\text{г, вп}}}{\nu}$  – критерий Рейнольдса в начале веерного потока;  $\text{Re}_0 = \frac{U_0 d_0}{\nu}$  – критерий Рейнольдса в струйной части потока.

Из вышеприведенных данных видно, что величины коэффициентов расширения и инжекции по величине близки друг к другу, что объясняется по существу одной и той же причиной их появления и существования. Более существенная зависимость  $k'_U$  от  $h/d_0$  по сравнению с изменениями  $k_U$  объясняется тем, что с увеличением  $h/d_0$  одновременно изменяются как начальная средняя скорость веерного потока, так и скорость на оси струи.

При относительных расстояниях  $h/d_0 > 10$  эти коэффициенты изменяются в меньшей степени в связи с уменьшением скоростей, их определяющих.

Из рис. 5 также видно, что только два коэффициента ( $k_R$  и  $k_V$ ) имеют значения больше единицы, что обусловлено физикой аэродинамических процессов. Относительно слабая зависимость коэффициента  $k_U$  от  $h/d_0 \geq 10$  свидетельствует о том, что темп изменения скоростей на оси струи и в начале веерного потока слабо зависит от  $h/d_0$  и только при  $h/d_0 \leq 10$  эта зависимость проявляется более существенно. Изменение коэффициента  $k'_U$  в зависимости от относительного расстояния  $h/d_0$  носит более выраженный характер, так как средняя начальная скорость в веерном потоке существенно отличается от начальной скорости истечения газа на срезе сопла практически во всем интервале изменения  $h/d_0$ . Указанное обстоятельство еще раз подтверждает необходимость проведения расчетов теплообмена по величинам, характерным для веерного потока.

**Выводы.** Предложена методика расчета конвективной теплоотдачи при взаимодействии одиночной струи с поверхностью, основанная на введенных понятиях энергодинамической плотности и энергодинамической мощности газового потока и учитывающая особенности веерной части потока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асцатуров В.Н., Краснокутский П.Г. Исследование теплообмена при струйном нагреве заготовок // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 1. С. 56 – 58.
2. Асцатуров В.Н., Берковская П.С., Краснокутский П.Г. Исследование нагрева металла атакующими струями при разработке многорядных печей // Сб. научн. тр. ВНИИПИТеплопроект: печи и сушила в машиностроительной промышленности. 1978. Вып. 45. С. 3 – 10.
3. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // Цветные металлы. 2011. № 12. С. 89 – 93.
4. Прибытков И.А. Энергосберегающие способы нагрева металла на основе использования струй // Сб. научн. тр. конф.: «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М.: МИСиС, 2002. С. 375 – 390.
5. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Ратников П.Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой // Литье и металлургия. 2007. № 2. С. 63 – 66.
6. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. – М.: Машиностроение, 1977. – 247 с.
7. Lisienko V.G., Shleimovich E.M. Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for intensifying the heating of metal // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54. No. 3. P. 188 – 195.
8. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Интенсификация конвективного теплообмена в нагревательных и термических печах // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2017. № 3. С. 105 – 112.
9. Прибытков И.А., Титова Г.В. Особенности струйного нагрева термически тонкого металла // Изв. вуз. Черная металлургия. 1993. № 9 – 10. С. 51 – 54.
10. Прибытков И. А. Расчет теплового состояния металла при импульсно-скоростном нагреве // Изв. вуз. Черная металлургия. 1995. № 1. С. 53 – 56.
11. Курносов В.В., Шульц Л.А. Проблемы безокислительного обезуглероживающего высокотемпературного нагрева стали в топливных печах и возможные пути их решения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 11. С. 10 – 14.
12. Асцатуров В.Н. Интенсификация тепловой работы нагревательных печей // Сб. научн. тр. конф.: «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М.: МИСиС, 2002. С. 36 – 40.
13. Lèprevost J.-C., Lefèvre A., Brancher, J.-P., Saadjiàn Estéban. Chaotic mixing and heat transfer in a periodic 2D flow // Comptes Rendus de l'Académie de Sciences. Serie IIb: Mécanique, Physique, Chimie, Astronomie. 1997. Vol. 325. P. 519 – 526.
14. Crow S.C., Champagne F.H. Orderly structure in jet turbulence // Journal of Fluid Mechanics. 1971. Vol. 48. P. 547 – 591.
15. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методика расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
16. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984. – 716 с.

17. Michalke A. On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer // *J. Fluid Mechanics*. 1965. Vol. 23. Part 3. P. 521–544.
18. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the nearfield entrainment of round jets // *J. Fluid Mechanics*. 1992. Vol. 245. P. 643–68.
19. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Т. 1: Учеб. руководство для вузов. – М.: Наука, 1991. – 600 с.
20. Кривандин В.А., Арутюнов В.А., Белоусов В.В. Теплотехника металлургического производства. Т. 1. – М.: МИСИС, 2001. – 608 с.

Поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.  
После доработки 6 декабря 2018 г.  
Принята к публикации 31 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 3, pp. 208–214.

## ON THE CALCULATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER UNDER MUTUAL-ACTION OF A JET WITH LIMITING SURFACE

I.A. Pribytkov, S.I. Kondrashenko

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** The paper proposes a method for calculating convective heat transfer in the interaction of a single circular jet with a flat surface. The differences of the proposed method from the existing ones are given. The concepts “energodynamic potential of the flow” and “energodynamic power of the flow” are introduced, allowing to determine the intensity of convective heat transfer at “gas-solid” boundary. Differences of the proposed definitions from the existing ones are given: heat flux and heat flux density. The principal difference between the heat flux density  $q$  and the energy dynamic potential  $q_3$  is as follows: the heat flux density  $q$  for convective heat transfer problems means the amount of heat that is transferred from a liquid to a solid surface (or vice versa) per unit of time through a unit of heat exchange surface area. Thus, quantity  $q$  characterizes the intensity of convective heat transfer process at the interface. The energy dynamic potential  $q_3$  characterizes the flow property as a source or carrier of heat. Value of  $q_3$  characterizes the specific energy power of the fluid flow. When calculating the heat transfer, it was proposed to divide the jet when interacting with the flat surface into two parts: before the interaction – the jet part, after – the fan flow. The method for calculating convective heat transfer under jet heating, in which the Reynolds criterion calculated by characteristics of the gas at the nozzle exit is decisive, is not entirely correct. It is proposed to use criteria specific to the fan flow. Characteristic values for the fan flow are its initial average velocity  $U_{\text{fan}}$ , distance from the critical point of the jet (point of intersection of vertical axis of the jet with the surface) to the current coordinate of radius downstream. To assess the changes in basic characteristics of a free jet at different distances from the nozzle exit to limiting surface, dependences of the following criteria are presented: jet expansion coefficient; jet injection coefficient; velocity coefficient for any jet section; velocity coefficient for any jet section, except  $h/d_0 = 0$ ; relation of the Reynolds criteria, confirming the need to carry out calculations of heat transfer on the values characteristic separately for the fan flow.

**Keywords:** jet heating, “attacking” jet, fan flow, convective heating, numerical simulation, convective heat transfer, fields of velocity, Reynolds criterion, energy-dynamic potential, energy-dynamic power.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-208-214

### REFERENCES

- Astsatur V.N., Krasnokutskii P.G. Heat transfer during jet heating of billets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978, no. 1, pp. 56–58. (In Russ.).
- Astsatur V.N., Berkovskaya P.S., Krasnokutskii P.G. Investigation of metal heating by attacking jets in the development of multi-row furnaces. In: *Sb. nauchn. trudov VNIIPITeploproekt: pechi i sushila v mashinostroitel'noi promyshlennosti* [VNIIPITeploproekt: furnaces and dryers in the engineering industry. Coll. of sci. works of VNIIPIT]. 1978, Issue 45, pp. 3–10. (In Russ.).
- Vokhmyakov A.M., Kazyayev M.D., Kazyayev D.M. Investigation of convective heat transfer in a through furnace equipped with high-speed burners. *Tsvetnyye metally*. 2011, no. 12, pp. 89–93. (In Russ.).
- Pribytkov I.A. Energy-saving methods of metal heating based on the use of jets. In: *Sb. nauchn. trudov konferentsii: Avtomatizirovannyye pechnyye agregaty i energosberegayushchie tekhnologii v metallurgii* [Coll. of sci. works of the conf.: Automated furnaces and energy-saving technologies in metallurgy]. Moscow: MISiS, 2002, pp. 375–390. (In Russ.).
- Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A., Ratnikov P.E. Possibilities of application of metal jet heating before rolling. *Lit'e i metallurgiya*. 2007, no. 2, pp. 63–66. (In Russ.).
- Yudaev B.N., Mikhailov M.S., Savin V.K. *Teploobmen pri vzaimodeystvii strui s pregradami* [Heat transfer at the interaction of jets with obstacles]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 247 p. (In Russ.).
- Lisienko V.G., Shleimovich E.M. Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for intensifying the heating of metal. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013, vol. 54, no. 3, pp. 188–195.
- Biryukov A.B., Gnatiev P.A. Intensification of convective heat exchange in heating and thermal furnaces. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2017, no. 3, pp. 105–112. (In Russ.).
- Pribytkov I.A., Titova G.V. Features of jet heating of thermally thin metal. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1993, no. 9-10, pp. 51–54. (In Russ.).
- Pribytkov I.A. Calculation of metal thermal state at pulse-speed heating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 1, pp. 53–56. (In Russ.).
- Kurnosov V.V., Shul'ts L.A. High temperature nonoxidizing nondecarburizing heating of steel in combined fuel furnaces: problems and decisions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 11, pp. 10–14. (In Russ.).
- Astsatur V.N. Intensification of thermal work of heating furnaces. In: *Sb. nauchn. trudov konferentsii: Avtomatizirovannyye pechnyye agregaty i energosberegayushchie tekhnologii v metallurgii* [Coll. of sci. works of the conf.: Automated furnaces and energy-saving technologies in metallurgy]. Moscow: MISiS, 2002, pp. 36–40. (In Russ.).
- Leprevost J.-C., Lefèvre A., Brancher, J.-P., Saadjan Estéban. Chaotic mixing and heat transfer in a periodic 2D flow. *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences. Serie IIb: Mécanique, Physique, Chimie, Astronomie*. 1997, vol. 325, pp. 519–526.
- Crow S.C., Champagne F.H. Orderly structure in jet turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 1971, vol. 48, pp. 547–591.
- Gusovskii V.L., Lifshits A.E. *Metodika rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei: Uchebno-spravochnoe izdanie* [Method of calculating heating and thermal furnaces: Educational reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 400 p. (In Russ.).
- Abramovich G.N. *Teoriya turbulentykh strui* [Theory of turbulent jet]. Moscow: Nauka, 1984, 716 p. (In Russ.).
- Michalke A. On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer. *J. Fluid Mechanics*. 1965, vol. 23, Part 3, pp. 521–544.

18. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the nearfield entrainment of round jets. *J. Fluid Mechanics*. 1992, vol. 245, pp. 643–68.
19. Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika. T. 1: Ucheb rukovodstvo dlya vtuzov* [Applied gas dynamics. Vol. 1: Tutorial manual for technical universities]. Moscow: Nauka, 1991, 600 p. (In Russ.).
20. Krivandin V.A., Arutyunov V.A., Belousov V.V. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva* [Heat engineering of metallurgical production]. Vol. 1. Moscow: MISIS, 2001, 608 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**I.A. Pribytkov**, *Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”*  
(temp@misis.ru)

**S.I. Kondrashenko**, *Assistant of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”* (stas.misis@yandex.ru)

Received November 23, 2018

Revised December 6, 2018

Accepted January 29, 2019

---