

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Василий Яковлевич ГУБАРЕВ¹

Алексей Геннадьевич АРЗАМАСЦЕВ²

Аделина Сергеевна ШИПУЛИНА³

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ КРУПНОЙ ПЛОСКОЙ КАПЛИ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹ кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики,
Липецкий государственный технический университет
gv_lipetsk@rambler.ru

² кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры промышленной теплоэнергетики,
Липецкий государственный технический университет
arzamastcev-ag@mail.ru

³ аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики,
Липецкий государственный технический университет
adelino4ka@inbox.ru

Аннотация

При охлаждении высокотемпературной поверхности струями диспергированной жидкости для сравнительно малых значений плотности орошения основным фактором,

Цитирование: Губарев В. Я. Исследование процесса теплообмена при испарении крупной плоской капли на высокотемпературной поверхности / В. Я. Губарев, А. Г. Арзамасцев, А. С. Шипулина // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 10-23.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-10-23

определяющим интенсивность теплосъема, является теплообмен при испарении одиночной капли на охлаждаемой поверхности. В посвященных данной теме работах приведены решения для оценки времени испарения капли в плоском состоянии, при этом в расчетах не учитываются тепловые потоки, связанные с переносом тепла радиацией от стенки к капле и диффузионным испарением пара с внешней поверхности капли в окружающую среду. В статье рассматривается процесс теплообмена при испарении крупных плоских капель на высокотемпературной поверхности с учетом данных тепловых потоков. Получены формулы для расчета времени испарения крупной плоской капли до ее перехода в полусфероид и среднего коэффициента теплоотдачи с учетом теплового потока радиацией при условии отсутствия испарения с поверхности капель в окружающую среду. Расчеты показывают, что учет влияния радиационного теплового потока для температур стенки от 300 до 1 200 °С приводит к возрастанию среднего коэффициента теплоотдачи с 7-8 до 63-67%, что позволяет сделать вывод о существенном влиянии теплового потока излучением на величину суммарного теплосъема при достаточно высоких температурах стенки. Полученные зависимости для определения параметров теплообмена с учетом радиационного теплового потока дополнены оценкой максимально возможного влияния на процесс теплообмена диффузионного испарения с поверхности капли в окружающую среду. Показано, что диффузионный тепловой поток может оказывать существенное влияние на параметры теплообмена только при температуре поверхности до 700 °С. При более высоких значениях температуры стенки тепловой поток за счет испарения с внешней поверхности капли в окружающую среду будет существенно ниже радиационного теплового потока и расчеты можно проводить без учета влияния диффузионного испарения на интенсивность теплообмена.

Ключевые слова

Охлаждение высокотемпературной поверхности, крупная плоская капля, время испарения, радиационный тепловой поток, тепловой поток диффузией, коэффициент теплоотдачи.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-10-23

Введение

Охлаждение высокотемпературной поверхности струями диспергированной жидкости широко применяется в металлургии и энергетике. Исследованию теплообмена между высоконагретой поверхностью и охлаждающей жидкостью посвящены работы [1-6, 8-11]. При сравнительно малых значениях плотности орошения основным фактором, определяющим интенсивность теплосъема, является теплообмен между одиночной каплей известного начального объема и охлаждаемой поверхностью.

Теплообмен при взаимодействии капли с высоконагретой поверхностью (температура выше температуры Лейденфроста) может быть разделен на 2 неравные по времени стадии: практически мгновенное формирование парового слоя под каплей и стадию испарения капли. Результаты многочисленных экспериментов [3, 6] показывают, что для относительно крупных начальных объемов при взаимодействии с поверхностью капля сначала принимает форму близкую к ци-

линдрической. В процессе испарения диаметр плоской капли уменьшается, и при некотором его значении капиллярные силы преобразуют ее в полусфероид.

Стадия испарения капли в полусфероидальном состоянии описана в работах [2, 6], при этом в работе [2] приведена оценка времени испарения капли с учетом диффузионного теплового потока с поверхности капли в окружающую среду. Выявлено, что диффузионный тепловой поток существенно влияет на время испарения капли в полусфероидальном состоянии при температуре стенки менее 700 °С.

В работе [6] приведены зависимости для определения времени испарения крупной плоской капли и капли в полусфероидальном состоянии, при этом влияние радиационного теплового потока учтено только для полусферической капли. Отсутствуют зависимости для определения времени испарения и средних коэффициентов теплоотдачи при испарении крупной плоской капли до ее перехода в полусфероид, учитывающие влияние радиационного и диффузионных тепловых потоков.

Целью данной статьи является определение основных параметров теплообмена при испарении крупной плоской капли с учетом радиационного и диффузионного тепловых потоков.

Расчет теплообмена между плоской каплей и высокотемпературной поверхностью без учета радиационного теплового потока

При температурах охлаждаемой стенки выше температуры Лейденфроста капля отделена от поверхности паровым слоем, через который осуществляется теплообмен между каплей и поверхностью.

Относительно крупные капли имеют вначале процесса испарения форму цилиндра, высота которого постоянна и находится по формуле, м [6]:

$$H_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}}, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, $\rho_{ж}, \rho_{п}$ — плотности жидкости и пара соответственно, кг/м³.

Радиус основания крупной капли в начале процесса испарения равен, м:

$$R_k = \sqrt{\frac{V_{к0}}{\pi \cdot H_k}}, \quad (2)$$

где $V_{к0}$ — начальный объем капли, м³.

При расчете по формуле (1) высота крупной плоской капли воды будет равна приблизительно 4,85 мм.

Примем, что переход плоской капли в полусфероид происходит при условии равенства объема полусфероида и цилиндра при равных диаметрах их оснований, что дает:

$$H_k = \frac{2}{3} \cdot R_k. \quad (3)$$

Тогда величина объема, при котором плоская капля воды переходит в полусферическую, составляет приблизительно 0,8 мл.

Для расчета параметров теплообмена между высоконагретой поверхностью и плоской каплей применим методику, описанную в работе [6]. Согласно данному подходу, тепло от стенки к капле подводится только теплопроводностью через разделяющий их слой пара и полностью расходуется на испарение в этот слой. Сила давления в паровом слое равна весу капли, реактивные силы предполагаются пренебрежимо малыми по сравнению с весом капли. Течение пара в слое принимается ламинарным, а распределение давления находится из решения уравнения Навье — Стокса. Температура стенки принималась постоянной в течение процесса испарения, а температура поверхности капли считалась равной температуре насыщения при атмосферном давлении.

Тепловой поток теплопроводностью через паровой слой равен:

$$q_{\lambda} = \lambda_{\text{п}} \cdot \frac{\Delta T}{\delta_{\text{п}}}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{п}}$ — коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м·К), ΔT — разница температуры стенки и температуры насыщения при атмосферном давлении, °С.

Толщина парового слоя связана с радиусом капли [6]:

$$\delta_{\text{п}} = C^{0,25} \cdot R_{\text{к}}^{0,5}, \quad (5)$$

где $C = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda_{\text{п}} \cdot \mu_{\text{п}} \cdot \Delta T}{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot r \cdot g} \cdot \frac{1}{H_{\text{к}}} \right)$ — коэффициент пропорциональности, м²; r — теплота парообразования, Дж/кг; $\mu_{\text{п}}$ — динамическая вязкость пара, Па·с.

Время испарения капли в плоском состоянии определялось по формуле [6]:

$$\tau_{\text{исп}} = 2 \cdot \frac{R_{\text{к0}}^{0,5} - R_{\text{кпер}}^{0,5}}{A}, \quad (6)$$

где $A = 0,452 \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{п}} \cdot \Delta T}{\rho_{\text{ж}} \cdot r \cdot H_{\text{к}}} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}} \right)^{0,25}$, $R_{\text{к}}$, $R_{\text{кпер}}$ — радиусы капли в начальный момент времени и при переходе в полусферическое состояние соответственно, м.

Локальный коэффициент теплоотдачи будет находиться как:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\delta_{\text{п}}}. \quad (7)$$

Для нахождения среднего коэффициента теплоотдачи при испарении капли в плоском состоянии применим формулу:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{\tau_{\text{исп}}} \alpha \cdot d\tau}{\tau_{\text{исп}}} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \ln \left(\frac{R_{\text{к0}}}{R_{\text{кпер}}} \right)}{\tau_{\text{исп}} \cdot \Delta T}. \quad (8)$$

Результаты расчета по формуле (8) показывают, что средний коэффициент теплоотдачи незначительно уменьшается с ростом температуры поверхности и увеличением начального объема капли.

Расчет теплообмена между плоской каплей и высокотемпературной поверхностью с учетом радиационного теплового потока

Рассмотрим влияние радиационного теплового потока на интенсивность теплообмена с учетом методики, описанной в работе [6].

Суммарный тепловой поток через паровой слой с учетом радиационной составляющей равен:

$$q_{\Sigma} = q_{\lambda} + q_R = q_{\lambda} \cdot (1 + m_R), \quad (9)$$

где q_{λ} — плотность теплового потока теплопроводностью через паровой слой, приведенная к площади основания капли, Вт/м², q_R — плотность теплового потока излучением, Вт/м², m_R — отношение плотности тепловых потоков излучением и теплопроводностью.

Коэффициент m_R находится по формуле:

$$m_R = \frac{\delta_{\text{п}} \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{нас}}^4)}{\lambda_{\text{п}} \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{нас}})}, \quad (10)$$

где ε — степень черноты; $T_{\text{пов}}$ — температура насыщения при атмосферном давлении, К; $T_{\text{ст}}$ — температура стенки, К.

Введем коэффициент:

$$k_R = \frac{m_R}{\delta_{\text{п}}}. \quad (11)$$

В работе [6] оценка влияния радиационного потока для капли полусферической формы производится с помощью введения фиктивного коэффициента теплопроводности, учитывающего тепловой поток радиацией, при этом время испарения капли находится посредством численного решения итогового уравнения теплового баланса.

При определении времени испарения капли, представляется более обоснованным учитывать влияние радиационной составляющей теплового потока на толщину парового подслоя, величина которой определяет интенсивность процесса теплообмена.

С учетом подхода из работы [6], толщина парового слоя связана с текущим радиусом основания капли уравнением:

$$\delta_{\text{п}}^4 = (1 + k_R \cdot \delta_{\text{п}}) \cdot C \cdot R_{\text{к}}^2. \quad (12)$$

Из решения уравнения (12) можно найти толщины парового слоя в начале процесса испарения и в момент перехода капли в полусферическую форму. Толщина парового слоя при учете радиационного теплового потока будет выше, чем рассчитанная по формуле (5).

Из (12) выразим радиус капли через толщину парового слоя:

$$R_{\text{к}} = \frac{\delta_{\text{п}}^2}{\sqrt{C} \cdot (1 + k_R \cdot \delta_{\text{п}})^{0,5}}. \quad (13)$$

Продифференцировав выражение (13) по толщине парового слоя, которая в свою очередь является функцией времени, можно получить:

$$\frac{dR_{\text{к}}}{d\delta_{\text{п}}} = \sqrt{\frac{1}{C}} \cdot \frac{2 \cdot \delta_{\text{п}} + 1,5 \cdot k_R \cdot \delta_{\text{п}}^2}{(1 + k \cdot \delta_{\text{п}})^{1,5}} \cdot \frac{d\delta_{\text{п}}}{d\tau}. \quad (14)$$

Подведенное через паровой слой тепло расходуется на испарение капли:

$$\frac{\lambda_{\text{п}} \cdot \Delta T}{\delta_{\text{п}}} \cdot (1 + m_R) \cdot \pi \cdot R_{\text{к}}^2 = -r \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{к}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \frac{dR_{\text{к}}}{d\tau}. \quad (15)$$

Тогда время испарения капли в плоском состоянии с учетом радиационного теплового потока определяется из выражения:

$$\tau = 2 \cdot \frac{r \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot H_{\text{к}}}{\lambda_{\text{п}} \cdot \Delta T} \cdot \int_{\delta_{\text{п,пер}}}^{\delta_{\text{п,0}}} \frac{1,5 \cdot k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п}} + 2}{(1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п}})^2} \cdot d\delta_{\text{п}}, \quad (16)$$

где $\delta_{\text{п,0}}$, $\delta_{\text{п,пер}}$ — толщины парового зазора в начальный момент времени и при переходе капли в полусферическое состояние соответственно, м.

Интегрируя выражение (16), получим зависимость для расчета времени испарения плоской капли:

$$\tau_{\text{исп,рад}} = 2 \cdot \frac{r \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot H_{\text{к}}}{\lambda_{\text{п}} \cdot \Delta T} \cdot \frac{1}{k_{\text{R}}} \cdot \left(\frac{1,5 \cdot \ln \left(\frac{1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п,0}}}{1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п,пер}}} \right) - 0,5}{1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п,0}}} + \frac{0,5}{1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п,пер}}} \right). \quad (17)$$

Зависимость (17) дает возможность получить время испарения капли в плоском состоянии. Сравнивая время испарения плоской капли, посчитанное по формулам (6) и (17), можно сделать вывод, что радиационный тепловой поток начинает оказывать влияние на величину времени испарения при температурах стенки свыше 400 °С. При температуре стенки до 1 200 °С время испарения капли в плоском состоянии с учетом теплового потока радиацией может уменьшиться до 1,7 раза.

Локальный коэффициент теплоотдачи с учетом радиационного теплового потока:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\delta_{\text{п}}} \cdot (1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п}}). \quad (18)$$

Суммарный теплоотвод от стенки за счет радиационного теплового потока при одинаковых начальных объемах капли увеличится по сравнению с определенным по методике [6], в то время как тепловой поток теплопроводностью несколько снизится за счет увеличения толщины парового слоя.

Средний коэффициент теплоотдачи при испарении капли в плоском состоянии в этом случае будет находиться по формуле:

$$\alpha_{\text{ср,рад}} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \left(2 \cdot \ln \left(\frac{\delta_{\text{п,0}}}{\delta_{\text{п,пер}}} \right) - 0,5 \cdot \ln \left(\frac{1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п,0}}}{1 + k_{\text{R}} \cdot \delta_{\text{п,пер}}} \right) \right)}{\tau_{\text{исп,рад}} \cdot \Delta T}. \quad (19)$$

На рис. 1 приведен график зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности без учета и с учетом радиационного теплового потока для капли воды начальным объемом 2 мл.

С ростом начального диаметра капле средний коэффициент теплоотдачи будет незначительно уменьшаться, что объясняется увеличением толщины парового слоя, снижающего передачу тепла теплопроводностью от стенки к капле.

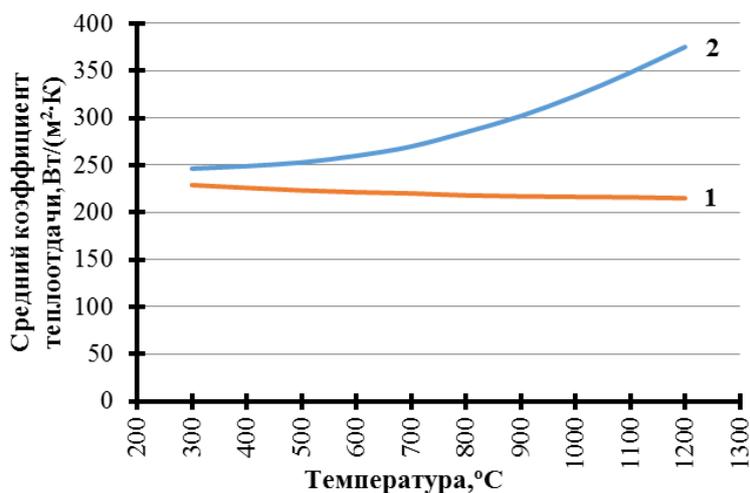


Рис. 1. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности для капли воды начальным объемом 2 мл: 1 — без учета радиационного теплового потока; 2 — с учетом радиационного теплового потока

Fig. 1. The dependence of the average heat transfer coefficient on the surface temperature for water droplet with initial volume 2 ml: 1 — without considering radiation heat flux; 2 — considering radiation heat flux

Средний коэффициент теплоотдачи без учета влияния излучения будет незначительно снижаться за счет возрастания перепада температур между поверхностью и каплей.

При учете влияния радиационного теплового потока увеличение температуры поверхности приводит к возрастанию среднего коэффициента теплоотдачи за счет быстрого роста теплового потока радиацией. В этом случае, изменение температуры стенки с 300 до 1200 °C для капель начальным объемом 1,5-2,5 мл, ведет к возрастанию величины среднего коэффициента теплоотдачи с 7-8 до 63-67% по сравнению с рассчитанным по формуле (8) средним коэффициентом теплоотдачи.

Оценка влияния диффузионного теплового потока на интенсивность теплообмена

Полученные выше зависимости (17) и (19) по определению основных параметров теплообмена не учитывают тепловой поток при диффузионном испарении с поверхности капли в окружающую среду.

Для оценки его влияния на интенсивность теплообмена используем методику, описанную в работе [6]. Диффузионный тепловой поток определяется: средней температурой поверхности капли, коэффициентом массоотдачи и парциальной плотностью пара в воздухе. Проведем оценку максимально возможного влияния диффузионного теплового потока на процесс теплообмена. Для

этого температуру поверхности капли приравняем к температуре насыщения и пренебрегаем парциальной плотностью пара в окружающей среде.

Количество теплоты, идущее на испарение пара в паровой слой с учетом диффузии, будет равно:

$$q_{\text{исп}} = q_{\lambda} + q_R - q_D = q_{\lambda} \cdot (1 + m_R - m_D), \quad (20)$$

где q_D — плотность теплового потока диффузией, приведенная к плоскости основания капли Вт/м², m_D — отношение тепловых потоков диффузией и теплопроводностью.

Плотность теплового потока диффузией с верхнего основания капли:

$$q_{D\text{верхн.осн.}} = r \cdot \rho_d(t_{\text{нас}}) \cdot \beta_{\text{верхн.осн.}} \quad (21)$$

где ρ_d — плотность пара при средней температуре боковой поверхности, кг/м³, $\beta_{\text{верхн.осн.}}$ — коэффициент массоотдачи для боковой поверхности, м/с.

Плотность теплового потока диффузией с боковой поверхности капли, приведенная к площади основания:

$$q_{D\text{бок.пов.}} = r \cdot \rho_d(t_{\text{нас}}) \cdot \beta_{\text{бок.пов.}} \cdot \frac{2 \cdot H_K}{R_K}, \quad (22)$$

где ρ_d — плотность пара при средней температуре боковой поверхности, кг/м³, $\beta_{\text{бок.пов.}}$ — коэффициент массоотдачи для боковой поверхности, м/с.

Коэффициент массоотдачи для верхнего основания плоской капли находится согласно тройной аналогии из критериального уравнения по определению коэффициента теплоотдачи для естественной конвекции [7]:

$$Nu_D = \frac{\beta_{\text{верхн.осн.}} \cdot l_{\text{хар}}}{D} = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr_D)^{0,25} = 0,54 \cdot \left(Gr \cdot \frac{\nu_{\text{п}}}{D} \right)^{0,25}, \quad (23)$$

где $\nu_{\text{п}}$ — коэффициент кинематической вязкости пара, м²/с, D — коэффициент диффузии, м²/с.

С уменьшением диаметра основания капли коэффициент массоотдачи и плотность приведенного теплового потока диффузией будут увеличиваться. Максимальное значение теплового потока будет достигаться при принятии в качестве характерного размера в формуле (22) — диаметра основания капли при переходе в полусфероидальное состояние.

Коэффициент массоотдачи для боковой поверхности плоской капли находится из критериального уравнения [7]:

$$Nu_D = \frac{\beta_{\text{бок.пов.}} \cdot l_{\text{хар}}}{D} = 0,8 \cdot (Gr \cdot Pr_D)^{0,25} = 0,8 \cdot \left(Gr \cdot \frac{\nu}{D} \right)^{0,25}, \quad (24)$$

В качестве характерного размера в формуле (23) принята высота капли.

Введем коэффициент:

$$k_D = \frac{m_D}{\delta_{\text{п}}}. \quad (25)$$

Применив подход из работы [6], толщину парового слоя находим из решения уравнения:

$$\delta_{\text{п}}^4 = C \cdot (1 + k_R \cdot \delta_{\text{п}} - k_D \cdot \delta_{\text{п}}) \cdot R_K^2. \quad (26)$$

В качестве характерного радиуса капли для определения толщин парового зазора в начале и в конце испарения капли в плоском состоянии примем $R_{к.пер.}$.

Используя принципы, изложенные в предыдущем разделе статьи при изучении влияния радиации на интенсивность теплообмена, получим зависимость для определения времени испарения плоской капли с учетом диффузионного теплового потока.

Время испарения капли в плоском состоянии в этом случае:

$$\tau_{исп} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho_{ж} \cdot H_{к}}{\lambda_{п} \cdot \Delta T} \cdot \left(\left(\frac{1,5}{k_R} + \frac{0,5}{k_D} \right) \cdot \ln \left| \frac{1 + k_R \cdot \delta_{п0}}{1 + k_D \cdot \delta_{ппер}} \right| - \right. \\ \left. - \frac{0,5}{k_D} \cdot \ln \left| \frac{1 + (k_R - k_D) \cdot \delta_{п0}}{1 + (k_R - k_D) \cdot \delta_{ппер}} \right| \right). \quad (27)$$

Тогда средний коэффициент теплоотдачи при испарении капли в плоском состоянии будет находиться по формуле:

$$\alpha_{ср} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho_{ж} \cdot H_{к}}{\lambda_{п} \cdot \Delta T} \cdot \left(2 \cdot \ln \left| \frac{\delta_{п0}}{\delta_{ппер}} \right| - 0,5 \cdot \ln \left| \frac{1 + (k_R - k_D) \cdot \delta_{п0}}{1 + (k_R - k_D) \cdot \delta_{ппер}} \right| \right). \quad (28)$$

На рис. 2 приведен график зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности, для капли воды начальным объемом 2 мл с учетом только радиационного теплового потока и с учетом радиационного и диффузионного тепловых потоков.

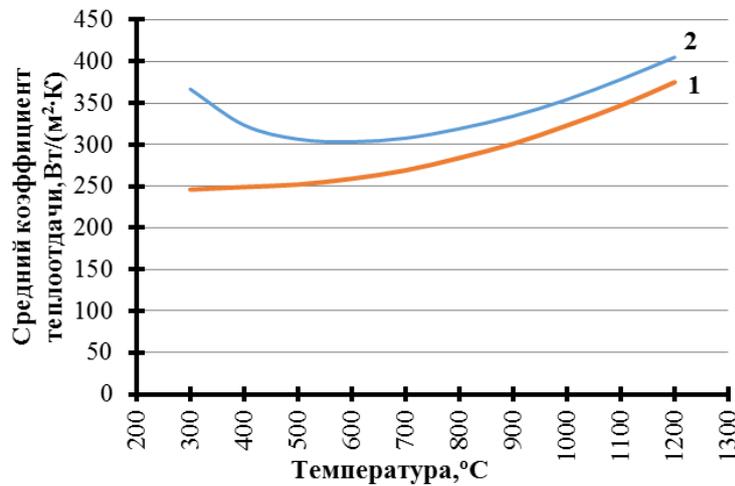


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности для капли воды начальным объемом 2 мл:
1 — с учетом только радиационного теплового потока;
2 — с учетом радиационного и диффузионного тепловых потоков

Fig. 2. The dependence of the average heat transfer coefficient on the surface temperature for water droplet with initial volume 2 ml:
1 — considering only the radiation heat flux;
2 — considering both radiation and diffusion heat flux

Средний коэффициент теплоотдачи с учетом диффузионного теплового потока для капель одинакового начального объема снижается с ростом температуры поверхности от 300 до 600 °С за счет увеличения толщины парового слоя при относительно незначительном радиационном тепловом потоке. При росте температуры стенки от 600 до 1 200 °С происходит резкое увеличение величины радиационного теплового потока, что приводит к повышению интенсивности теплообмена.

Стоит отметить, что учет диффузионного теплового потока при температурах от 300 до 600 °С приводит к возрастанию коэффициента теплоотдачи в 1,5-1,15 раза (на 50-15%). При температурах поверхности от 700 до 1 200 °С увеличение коэффициента теплоотдачи составляет около 10%.

Так как проводилась оценка максимально возможного влияния диффузионного теплового потока на параметры теплообмена, можно утверждать, что диффузионный тепловой поток оказывает существенное влияние на параметры теплообмена при температуре поверхности до 700 °С. При более высоких значениях температуры стенки влиянием диффузионного испарения на интенсивность теплоотвода можно пренебречь.

Заключение

В статье получена зависимость для определения времени испарения и среднего коэффициента теплоотдачи плоской капли с учетом радиационного теплового потока. Расчеты показывают, что учет влияния радиационного теплового потока для температур стенки от 300 до 1 200 °С приводит к возрастанию среднего коэффициента теплоотдачи с 7-8 до 63-67%, что свидетельствует о существенном влиянии радиационного теплового потока на интенсивность теплообмена при высоких температурах стенки. Проведена оценка максимального влияния на процесс теплообмена диффузионного испарения с поверхности капли в окружающую среду. Показано, что диффузионный тепловой поток оказывает существенное влияние на параметры теплообмена при температуре поверхности до 700 °С, при более высоких значениях температуры стенки его можно не учитывать при определении интенсивности теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарбер Э. А. Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов / Э. А. Гарбер, А. А. Гончарский, М. П. Шаравин // Москва: Металлургия, 1991. 256 с.
2. Губарев В. Я. Испарение капли на высокотемпературной поверхности / В. Я. Губарев, А. Г. Арзамасцев // Тепловые процессы в технике. 2010. № 2. С. 63-67.
3. Губарев В. Я. Исследование процесса испарения капель на высокотемпературной поверхности / В. Я. Губарев, А. С. Ефремова // Тезисы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 2. Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 127-129.

4. Губарев В. Я. Теплообмен газокапельной среды с высокотемпературной поверхностью / В. Я. Губарев, Ю. В. Шацких // Теплофизика высоких температур. 2005. №5. С. 774-779.
5. Губарев В. Я. Теплообмен при нормальном соударении капли с высокотемпературной поверхностью / В. Я. Губарев, Ю. В. Шацких // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 5. Испарение, конденсация. Двухфазные течения. Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. С. 101-103.
6. Исаченко В. П. Струйное охлаждение / В. П. Исаченко, В. И. Кушнырев // Москва: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
7. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел // Москва: Энергоатомиздат, 1981. 440 с.
8. Исаченко В. П. Экспериментальное исследование охлаждения плоской поверхности струей диспергированной жидкости / В. П. Исаченко, И. К. Сидорова // Теплоэнергетика. 1982. № 3. С. 30-33.
9. Кабаков З. К. Исследование условий теплообмена в зоне вторичного охлаждения УНРС // Известия Вузов. Черная металлургия. 1977. № 11. С. 184-187.
10. Emmerson G. S. The Effect of Pressure and Surfacematerial on the Leidenfrost Point of Diserete Drops of Water / G. S. Emmerson // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1975. Vol. 18. No 3. Pp. 381-386. DOI: 10.1016/0017-9310(75)90027-7
11. Wachters L. H. J. The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State / L. H. J. Wachters, N. A. J. Westerling // Chem. Engng. Science. 1966. Vol. 21. No 11. Pp. 1047-1056. DOI: 10.1016/0009-2509(66)85100-X

Vasiliy Ya. GUBAREV¹
Aleksy G. ARZAMASTSEV²
Adelina S. SHIPULINA³

STUDY OF HEAT EXCHANGE PROCESS IN EVAPORATION OF LARGE DROPLETS AT A HIGH TEMPERATURE FLAT SURFACE

¹ Cand. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department
of Industrial Heat Power Engineering,
Lipetsk State Technical University
gv_lipetsk@rambler.ru

² Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Department of Industrial Heat Power Engineering,
Lipetsk State Technical University
arzamastcev-ag@mail.ru

³ Postgraduate Student,
Department of Industrial Heat Power Engineering,
Lipetsk State Technical University
adelino4ka@inbox.ru

Abstract

When cooling a high temperature surface with liquid jet dispersed for relatively small values of the irrigation density, the main determinant of the intensity of heat removal is the heat transfer between a single droplet and the cooled surface. The papers on this topic provide solutions for estimating the time of drop evaporation in flat condition, though, in the calculations, they disregard the heat fluxes related to the heat transfer by radiation from the wall to the droplet evaporation and of the diffusion couple with the outer surface of the droplets in the environment.

This article discusses the process of heat exchange in the interaction of large droplets with high temperature flat surface based on the data of heat flow. The authors provide the formulas

Citation: Gubarev V. Ya., Arzamastsev A. G., Shipulina A. S. 2017. "Study of Heat Exchange Process in Evaporation of Large Droplets at a High Temperature Flat Surface". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 4, pp. 10-23.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-10-23

to calculate the time of evaporation of large drops to flat transition in one half of a spheroid and the average heat transfer coefficient considering heat flow by radiation in the absence of evaporation from the surface of droplets in the environment. Calculations show that accounting for the effects of radiation heat flux for the wall temperature from 300 to 1,200 °C leads to an increase in the average heat transfer coefficient from 7-8 to 63-67%, which shows a significant influence of heat flux radiation on the total heat removal at a sufficiently high temperature wall. The dependences for determining parameters of heat exchange considering the radiation heat flux are complemented by the estimate of the maximum possible effect on the heat transfer process of diffusion evaporation from droplet surface to the environment. The authors show that the diffusive heat flux may have a significant impact on the parameters of the heat transfer only when the surface temperature up to 700 °C. At higher values of wall temperature, the heat flux will be significantly lower than the radiation heat flux, due to evaporation from the outer surface of the droplet into the environment, and the calculations can be carried out without considering the influence of diffusion and evaporation on the heat transfer intensity.

Keywords

Cooling of high temperature surfaces, large flat drop, the evaporation, radiation heat flux, heat flux, diffusion, heat transfer coefficient.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-10-23

REFERENCES

1. Garber E. A., Goncharovskiy A. A., Sharavin M. P. 1991. *Tekhnicheskij progress system okhlazhdeniya prokatnykh stanov* [Technical Progress of Cooling Systems of Rolling Mills]. Moscow: Metallurgiya.
2. Gubarev V. Ja., Arzamastsev A. G. 2010. "Isparenie kapli na vysokotemperaturnoj poverhnosti" [Heat transfer by gravitational interaction of a drip with a high temperature surface]. *Teplovye processy v tehnike*, vol. 2, pp. 63-67.
3. Gubarev V. Ja., Efremova A. S. 2014. "Issledovanie processa isparenija kapel' na vysokotemperaturnoj poverhnosti" [Research of Features Evaporation of Large Drops on High Temperature Surface]. *Proceedings of the 6th Russian National Conference on Heat Transfer*, vol. 2, pp. 127-129. Moscow: Izdatel'skij dom MJeI.
4. Gubarev V. Ja., Shatskikh Yu. V. 2005. "Teploobmen gazokapel'noy sredy s vysokotemperaturnoy poverkhnost'yu" [The Gas-Droplet Heat Transfer Medium with High Temperature Surface]. *High Temperature*, vol. 5, pp. 774-779.
5. Gubarev V. Ja., Shatskikh Yu. V. 2006. "Teploobmen pri normal'nom soudarenii kapli s vysokotemperaturnoy poverkhnost'yu" [Heat Transfer at Normal Collision of Drops with High Temperature Surface]. *Proceedings of the 4th Russian National Conference on Heat Transfer*, vol. 5, pp. 101-103. Moscow: Izdatel'skij dom MJeI.
6. Isachenko V. P., Kushnyrev V. I. 1984. *Strujnoe ohlazhdenie* [Jet Cooling]. Moscow: Jenergoatomizdat.
7. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. 1981. *Teploperedacha* [Heat Transfer]. Moscow: Jenergoatomizdat.

8. Isachenko V. P., Sidorova I. K. 1982. "Eksperimental'noe issledovanie okhlazhdeniya ploskoy poverkhnosti struey dispergirovannoy zhidkosti" [Experimental Investigation of the Cooling of a Flat Surface by a Jet of Dispersed Liquid]. *Teploenergetika*, vol. 3, pp. 30-33.
9. Kabakov Z. K. 1977. "Issledovanie usloviy teploobmena v zone vtorichnogo okhlazhdeniya UNRS" [The Study of the Conditions of Heat Transfer in the Secondary Cooling Zone of Continuous Caster]. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya*, vol. 11, pp. 184-187.
10. Emmerson G. S. 1975. "The Effect of Pressure and Surface Material on the Leidenfrost Point of Discrete Drops of Water". *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 18, no 3, pp. 381-386. DOI: 10.1016/0017-9310(75)90027-7
11. Wachters L. H. J., Westerling N. A. J. 1966. "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State". *Chemical Engineering Science*, vol. 21, no 11, pp. 1047-1056. DOI: 10.1016/0009-2509(66)85100-X