

В.Я. Губарев, Ю.В. Шацких

Липецкий государственный технический университет, Россия

ТЕПЛООБМЕН ПРИ НОРМАЛЬНОМ СОУДАРЕНИИ КАПЛИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается теплообмен при взаимодействии крупнодисперсного газок капельного потока с высокотемпературной поверхностью. Такой тип взаимодействия и теплообмена характерен при форсуночном охлаждении непрерывнолитого металла или горячего проката. Принимается, что столкновение капель с поверхностью происходит по нормали. Для решения поставленной задачи применяется критериальный метод, основанный на использовании характерных величин, определяющих процесс теплообмена капли с поверхностью.

1. ВВЕДЕНИЕ

Тепловосприятие капли определяется ее теплообменом с газовой фазой при движении к поверхности и теплообменом с охлаждаемой поверхностью в период теплового контакта. Для оценки теплообмена на поверхности капли примем ряд предположений, позволяющих упростить расчетную схему процессов теплообмена:

1) поверхность капли, контактирующая с охлаждаемой поверхностью, плоская и отделена от нее паровой прослойкой;

2) давление пара в паровой прослойке определяется динамическим напором капли.

Тепловосприятие капли в ходе ее контакта с охлаждаемой поверхностью определяется процессом их динамического взаимодействия [1]. В ходе динамического взаимодействия на первом этапе происходит торможение капли и ее деформация, кинетическая энергия капли преобразуется в энергию поверхностного натяжения и частично расходуется на работу преодоления сил вязкого трения. После достижения минимальной толщины парового зазора между каплей и высокотемпературной поверхностью и ее максимальной деформации происходит отскок капли от поверхности с восстановлением формы и, частично, величины скорости. Динамическое взаимодействие носит кратковременный и нестационарный характер.

Получаемое каплей тепло определяется тепловым потоком теплопроводностью через паровую прослойку Q_1 и тепловым потоком от газовой фазы на внешнюю поверхность капли Q_2 . Для получения решения уравнений, описывающих Q_1 и Q_2 , даже в принятых допущениях требуется решение дифференциального уравнения движения жидкости при деформации капли, что не дает достоверных результатов даже в случае численных решений ввиду сложности и неопределенности условий однозначности. Кроме того, численные решения не дают

возможности выявить влияние параметров капли на теплообмен. Поэтому оценим тепловосприятие капли с точностью до постоянных коэффициентов, используя характерные для теплового контакта величины. В качестве таких характерных величин для определения тепловосприятия капли через паровую прослойку можно использовать толщину парового зазора в момент полного торможения и время теплового контакта τ_0 .

2. ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЛИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассматривается нормальное столкновение капли с поверхностью.

Процесс столкновения капли с поверхностью и ее деформация происходит в несколько стадий (данные скоростной киносъемки [2]). В первоначальный момент деформируется передняя полусфера с образованием плоской поверхности с диаметром, соответствующим начальному диаметру капли, и отделенной от высокотемпературной поверхности тонким паровым слоем. На второй стадии происходит полное торможение капли с образованием плоского диска, нормальная к поверхности скорость движения капли преобразуется в радиальную скорость растекания капли вдоль поверхности. Образовавшийся плоский диск под действием динамического напора радиальной скорости продолжает растекаться и утончается вплоть до достижения максимального диаметра. Максимальный радиус деформированного плоского диска для идеальной жидкости находится из условия сохранения энергии капли [3] и определяется выражением

$$K_d = \sqrt{\frac{We}{6} + 1}. \quad (1)$$

Но деформация капли в диск максимального диаметра не определяет время контакта с поверхностью и их взаимодействие носит более сложный характер.

Учитывая наличие между каплей и поверхностью паровой прослойки, давление в центре которой равно динамическому напору движущейся нормально к поверхности жидкости, время контакта определяется наличием нормальной скорости, поддерживающей давление в паровой прослойке. После полного торможения капли давление парового слоя определяет процесс отскока капли, который начинается до полной деформации капли в диск. Численное решение дифференциального уравнения движения жидкости в капле при ее растекании, как в

период торможения, так и в период отскока весьма затруднительно в силу сложности и неопределенности условий однозначности. Вместе с тем время торможения капли можно оценить из простых балансовых соотношений с использованием характерных величин. Так как торможение капли начинается с момента касания высокотемпературной поверхности и, следовательно, происходит на расстоянии не более $2R$, оно может быть определено как $\tau_{\text{торм}} = 2R/W_{\text{ср}}$. Если принять в первом приближении $W_{\text{ср}} = W_{\text{к}}/2$, то $\tau_{\text{торм}} = 4R/W_{\text{к}}$. Отскок капли протекает при продолжающейся деформации, т.е. действующие на каплю силы в период торможения и отскока различны и время торможения не совпадает с временем отскока. Учитывая, что определяющим фактором является именно торможение капли и само время торможения определяется с точностью до постоянного коэффициента, можно принять время отскока равным времени торможения. Таким образом, время контакта капли при динамическом взаимодействии с поверхностью, т.е. время торможения и отскока $\tau_0 = 2\tau_{\text{торм}} = 8R/W_{\text{к}}$.

3. ТЕПЛОВСПРИЯТИЕ КАПЛИ

Тепловсприятие капли рассчитываем при температуре насыщения. В этом весь тепловой поток на каплю от поверхности расходуется на процесс парообразования.

Учитывая, что за время теплового контакта диаметр взаимодействующего с поверхностью объема капли меняется от первоначального до максимального, в конце периода отскока близкого к диаметру полной деформации, в качестве характерного размера поверхности теплообмена примем средний диаметр деформации K_0 .

Так как коэффициент деформации за время теплового контакта меняется от 1 до $K_{\text{д}}$, примем средний коэффициент деформации: $K_0 = \frac{1 + K_{\text{д}}}{2} =$

$$= 0.5 + \sqrt{\frac{We}{24}} + 0,25. \quad (2)$$

Это выражение не очень удобно для расчетов, поэтому можно предложить его упрощенную форму, дающее хорошее совпадение в диапазоне значений критерия Вебера 1 — 3000.

$$K_0 = \sqrt{\frac{We}{16}} + 1. \quad (2)$$

Тогда тепловсприятие капли можно определить как

$$Q_1 = \frac{\lambda_{\text{п}}}{4\delta_0} \nu \pi d_{\text{к}}^2 K_0^2 \tau_0, \quad (3)$$

где $\nu = t_{\text{пов}} - t_{\text{к}}$ — температурный напор, К.

Как говорилось выше, для расчета тепловсприятия необходимо знать характерный параметр процесса — толщину паровой прослойки. В работе [1] для определения толщины парового зазора принято, что давление в центре капли определяется по-

терями на трение при течении пара, которые находятся на основании решения уравнения Навье-Стокса для безградиентного течения. Для градиента давления получено выражение $\frac{dp}{dR} = -6 \frac{\lambda_{\text{п}} \nu_{\text{п}} R}{r \delta^4}$,

которое с учетом перегрева пара легко преобразуется к виду

$$\frac{dp}{dR} = -6 \left(\frac{\lambda_{\text{п}} \nu}{r \rho_{\text{п}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{п}}}{k_{\text{п}}} \left(\frac{\nu_{\text{п}} r \rho_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}} \nu} \right) \frac{R}{\delta^4}, \quad (3)$$

где $k_{\text{п}} = \Delta i_{\text{п}}/r$ — коэффициент перегрева пара в зазоре; $\Delta i_{\text{п}} = i_{\text{п}} - i'$ — перегрев пара, кДж/кг; i' — энтальпия насыщения воды, кДж/кг. Комплекс

$a_{*\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{п}} \nu}{r \rho_{\text{п}}}$ можно представить как условный коэффициент

температуропроводности пара с учетом теплоты парообразования, а $\nu_{\text{п}}/a_{*\text{п}}$ — условный критерий Прандтля $Pr_{*\text{п}}$.

Тогда выражение для градиента давления примет вид

$$\frac{dp}{dR} = -6 a_{*\text{п}}^2 \frac{\rho_{\text{п}} Pr_{*\text{п}} R}{k_{\text{п}} \delta^4}. \quad (4)$$

Условием торможения капли является равенство максимального давления в паровом зазоре p_0 динамическому давлению капли, откуда получаем выражение для толщины зазора

$$\delta = 1,1 \frac{\rho_{*}^{0,25} Pr_{*\text{п}}^{0,25} K_0^{0,5}}{k_{\text{п}}^{0,25} Re_{*\text{п}}^{0,5}} d_{\text{к}}, \quad \text{где } Re_{*\text{п}} = \frac{W_{\text{к}} d_{\text{к}}}{a_{*\text{п}}}$$

— критерий Пекле, определяющий теплообмен между каплей и высокотемпературной поверхностью, $\rho_{*} = \rho_{\text{п}}/\rho_{\text{к}}$ — относительная плотность пара в зазоре. С учетом того, что критерий Пекле можно выразить через критерии Рейнольдса $Re_{\text{к}} = W_{\text{к}} d_{\text{к}}/\nu_{\text{п}}$ и Прандтля $Re_{*\text{п}} = Re_{\text{к}} Pr_{*\text{п}}$, получаем выражение для толщины паровой прослойки в безразмерном виде

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{d_{\text{к}}} = 1,1 \frac{\rho_{*}^{0,25} K_0^{0,5}}{k_{\text{п}}^{0,25} Re_{\text{к}}^{0,5} Pr_{*\text{п}}^{0,25}}. \quad (5)$$

Тепловсприятие капли через паровой зазор после подстановки в (3) толщины парового слоя (5) определяется как

$$Q_1 = C \frac{\lambda_{\text{п}} \nu d_{\text{к}}^2 Re_{\text{к}}^{0,5} Pr_{*\text{п}}^{0,25} k_{\text{п}}^{0,25} K_0^{1,5}}{W_{\text{к}} \rho_{*}^{0,25}}. \quad (6)$$

Принятые допущения позволили получить уравнение, использующее обычные определяющие критерии подобия конвективного теплообмена (Рейнольдса и Прандтля), параметры пара при этом находятся по средней температуре в паровом зазоре $t = t_{\text{с}} + 0,5\nu$. Тепловсприятие капли прямо пропорционально ее скорости и пропорционально диаметру в степени 3,25.

Постоянный коэффициент C в принятых условиях имеет расчетное значение 5,28 и существенно завышен, так как определяет тепловсприятие капли

при характерных величинах, принятых для максимума интенсивности теплообмена. Этот коэффициент требует уточнения на основе экспериментальных данных. Экспериментальные данные по тепловосприятию капли практически отсутствуют, имеющиеся экспериментальные данные [3,4] относятся к форсуночному охлаждению металла и представлены в виде зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности орошения или перепада давления на распыливающем устройстве, причем не измерялись ни скорость, ни размеры капель. Вместе с тем в первом приближении можно сопоставить расчетные и экспериментальные результаты если использовать обобщенную характеристику теплоотвода от поверхности — коэффициент испарения, представляющий собой отношение количества отведенного единицей массы жидкости от поверхности тепла к теплоте парообразования $k_{исп} = \frac{\alpha v}{rg\rho_k}$.

Обработка экспериментальных данных показывает, что для форсуночного охлаждения горячего металла с температурой поверхности 1000 °С коэффициент испарения составляет 0.06 – 0.08. Соответствие расчетных коэффициентов испарения для одиночной капли $k_{исп} = \frac{Q_1}{rM_k}$ имеет место при $C \approx 2.5$, поэтому можно предложить в первом приближении величину коэффициента $C = 2.5$. В этом случае тепловосприятие капли находится как

$$Q_1 = 2.5 \frac{\lambda_p v d_k^2}{W_k} \frac{Re_k^{0.5} Pr_{исп}^{0.25} k_p^{0.25} K_0^{1.5}}{\rho_*^{0.25}}. \quad (7)$$

На рис. 1 представлены зависимости расчетного тепловосприятия водяной капли, имеющей температуру насыщения, от ее диаметра при температуре поверхности 1000 °С, рассчитанного по уравнению (7).

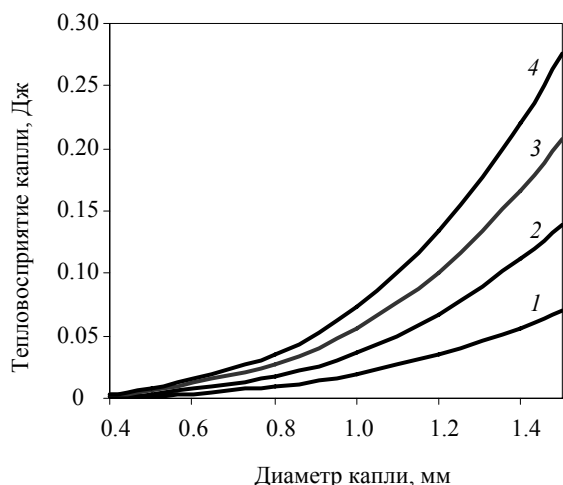


Рис. 1. Зависимости тепловосприятия от диаметра капли при температуре насыщения и скорости капли: 1 – 5 м/с; 2 – 10 м/с; 3 – 15 м/с; 4 – 20 м/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости для расчета теплообмена при нормальном столкновении крупнодисперсной капли с высокотемпературной поверхностью. Расчетные уравнения получены на основе критериального анализа с точностью до постоянного коэффициента. Конкретное значение постоянного коэффициента получено на основе анализа экспериментальных данных.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 - C – коэффициент;
 - d – диаметр капли, м;
 - g – плотность орошения, м³/(м²·с);
 - i – энтальпия, Дж/кг;
 - K – коэффициент деформации;
 - k – коэффициент испарения;
 - M – масса капли, кг;
 - p – давление, Па;
 - R – радиус капли, м;
 - r – теплота парообразования, Дж/кг;
 - t – температура, °С;
 - Q – тепловосприятие, Дж;
 - W – скорость капли, м/с;
 - We – критерий Вебера;
 - Re – критерий Рейнольдса;
 - Pr – критерий Прандтля;
 - Pe – критерий Пекле;
 - α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 - δ – толщина паровой прослойки, м;
 - λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 - ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с;
 - ρ – плотность, кг/м³;
 - τ – время, с;
 - v – температурный напор, К.
- Индексы:
- д – деформация;
 - исп – испарение;
 - к – капля;
 - п – пар;
 - пов – поверхность;
 - ср – средний;
 - торм – торможение;
 - 0 – полная деформация;
 - * – условный параметр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исаченко В.П., Кушнырев В.И.** Струйное охлаждение. М.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
2. **Wachters L.H.J., Westerling N.A.J.** The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state // Chem. Engineering Science, 1966. Vol.21. No 11. P. 1047—1056.
3. **Динер А.** Обзор литературы по теплоотдаче при струйном охлаждении // Черные металлы. 1976. №4. С. 26—29.
4. **Форсуночное** охлаждение высокотемпературных поверхностей / Л.И. Урбанович, В.А. Горяинов, В.В. Севостьянов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1981. №3. С. 156—160.