

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ КАСАТЕЛЬНОМ СОУДАРЕНИИ КАПЛИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

### АННОТАЦИЯ

При охлаждении высокотемпературной поверхности дисперсным потоком капли сталкиваются с поверхностью преимущественно под углом. Для анализа процесса теплообмена предлагается использовать характерные величины – минимальную толщину парового зазора и характерное время теплового взаимодействия, позволяющие получить критерии подобия теплового взаимодействия капли с высокотемпературной поверхностью.

Предложена модель течения пара в зазоре, учитывающая касательную составляющую скорости капли.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При столкновении капли под углом к поверхности, процессы деформации и отскока капли определяются нормальной составляющей скорости  $W_n$ , следовательно, время теплового взаимодействия  $\tau_{0н}$  и коэффициент деформации  $K_{0н}$  находятся с учетом нормальной составляющей скорости капли. В этом случае время теплового взаимодействия  $\tau_{0н} = 4 \frac{d_k}{W_n}$ , а  $K_{0н} = \sqrt{\frac{We_n}{16} + 1}$ , где

$We_n = \frac{\rho_k d_k W_n^2}{\sigma}$  — критерий Вебера. При анализе теплообмена примем, что температура капли равна температуре насыщения, теплообмен определяется теплопроводностью через паровой зазор и весь тепловой поток на каплю идет на испарение с поверхности капли в паровой зазор.

### 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЛИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Процесс теплообмена при тепловом контакте с поверхностью капли определяется теплопроводностью через паровую прослойку, толщина которой зависит как от нормальной  $W_n$ , так и касательной составляющей скорости капли  $W_\tau$ .

Для анализа течения пара в зазоре между каплей и поверхностью представим его как результат суперпозиции двух течений – радиального (относительно центра капли) и относительного течения

вдоль поверхности с касательной составляющей скорости капли. Тогда расход пара из зазора можно представить в виде суммы расходов через кольцевое сечение, определяемого радиальной составляющей скорости, и через миделевое сечение зазора, определяемого касательной составляющей скорости капли,  $V = 2\pi R \delta W_r(R) + 2R \delta W_\tau$ . Расход пара, определяемый тепловым потоком через зазор, выражается

как  $V = \frac{\lambda_\pi \vartheta_0 \pi R^2}{\delta \Delta i_\pi \rho_\pi}$ , где  $v_0 = t_{пов} - t_k$  – температур-

ный напор, К. Таким образом, получаем выражение

для радиальной скорости  $W_r(R) = \frac{\lambda_\pi v_0 R}{2\delta^2 r k_\pi \rho_\pi} - \frac{W_\tau}{\pi}$ ,

где  $k_\pi = \Delta i_\pi / r$  – коэффициент перегрева пара в за-

зоре. Комплекс  $\frac{\lambda_\pi \vartheta_0}{r \rho_\pi} = a_{*\pi}$  можно представить как

условный коэффициент теплопроводности пара в паровом зазоре с учетом теплоты парообразования. В этом случае выражение для радиальной скорости принимает вид  $W_r(R) = \frac{1}{2} \frac{a_{*\pi} R}{k_\pi \delta^2} - \frac{W_\tau}{\pi}$ .

Давление в центре капли находим на основании решения уравнения Навье-Стокса для безградиентного радиального течения со скоростью  $W_r(R)$ . Условием торможения капли является равенство максимального давления в паровом зазоре  $p_0$  динамическому давлению капли, отсюда получаем биквадратное уравнение для толщины парового зазора в момент полного торможения капли.

$$2W_n^2 \delta^4 + 24\rho_* a_{*\pi} d_k K_{0н} \frac{W_\tau v_\pi}{\pi a_{*\pi}} \delta^2 - 3\rho_* \left( a_{*\pi} d_k K_{0н} \right)^2 \frac{v_\pi}{k_\pi a_{*\pi}} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_* = \rho_n / \rho_k$  относительная плотность пара в зазоре. Решение уравнения (1) имеет вид

$$\delta = 2.45 \left( \rho_* \frac{a_{*\pi} d_k K_{0н}}{W_n} \right)^{0.5} \left( \frac{v_\pi}{a_{*\pi}} \right)^{0.25} \left\{ \left[ \left( \frac{W_\tau}{\pi W_n} \right)^2 + \frac{1}{24\rho_* \frac{v_\pi k_\pi}{a_{*\pi}}} \right]^{0.5} - \frac{W_\tau}{\pi W_n} \right\}. \quad (2)$$

Преобразуем полученное уравнение с использованием критериев теплового взаимодействия капли с поверхностью  $Re_{к,п} = W_к d_к / \nu_п$  и  $Pr_{к,п} = \nu_п / a_п$ . Составляющие скорости капли выражаются через угол  $\gamma$  между скоростью капли и нормалью к поверхности как  $W_\tau = W_к \sin \gamma$  и  $W_n = W_к \cos \gamma$ .

$$\beta = \frac{\left\{ \left[ \left( 1.56 \text{tg} \gamma \rho_*^{0.5} Pr_{к,п}^{0.5} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} - 1.56 \text{tg} \gamma \rho_*^{0.5} Pr_{к,п}^{0.5} \right\}}{(\cos \gamma)^{0.5}} \left( \frac{K_{0н}}{K_0} \right)^{0.5} \quad (4)$$

Величина  $\beta$  представляет собой коэффициент, зависящий от угла падения капли и критерия Вебера, определяющего коэффициенты деформации  $K_{0н}$  и  $K_0$ , который находится по полной скорости капли  $W_к$ . Заметим, что выражение для толщины парового зазора при нормальном столкновении полностью соответствует полученному ранее [1], с учетом преобразования его с использованием критериев подобия.

На рис. 1 приведена расчетная зависимость относительного увеличения толщины паровой прослойки при различных значениях числа Вебера.

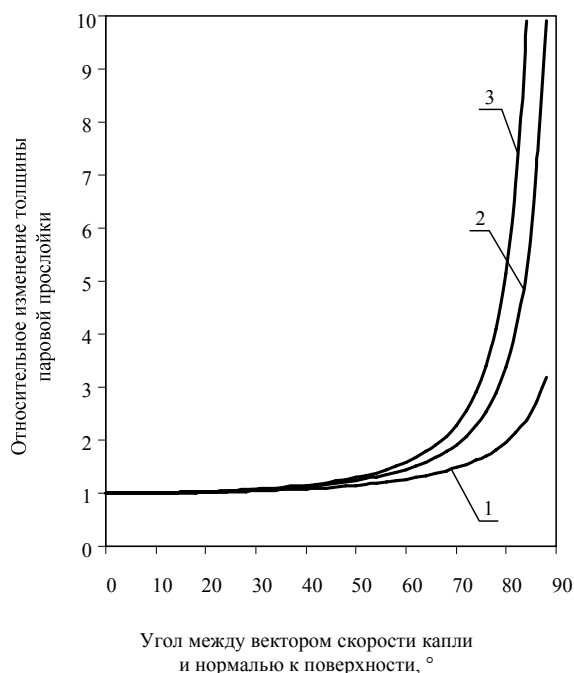


Рис. 1. Относительная толщина парового зазора: 1 –  $We = 10$ ; 2 –  $We = 50$ ; 3 –  $We = 1000$

Тепловосприятие капли определим в предположении подобия теплового контакта капель с поверхностью с использованием характерных величин — толщины парового зазора и времени теплового взаимодействия с учетом того, что время теплового взаимодействия находится при подстановке нормальной составляющей скорости капли.

Тогда

$$\delta = 1.1 \frac{\rho_*^{0.25} K_0^{0.5}}{k_п^{0.25} Re_к^{0.5} Pr_{к,п}^{0.25}} d_к \beta = \delta_n \beta, \quad (3)$$

где  $\delta_n$  – толщина парового зазора при нормальном столкновении капли.

Здесь введено обозначение

$$Q_1 = \frac{\lambda_п}{4\delta} \nu_0 \pi d_к^2 K_{0н}^2 \tau_{0н}. \text{ Учитывая, что эта формула}$$

использует характерные значения, она определяет тепловосприятие капли с точностью до постоянного коэффициента

После соответствующих подстановок получаем выражение для тепловосприятия капли с точностью до постоянного коэффициента

$$Q_1 = C \frac{\lambda_п \nu_0 d_к^2 Re_к^{0.5} Pr_{к,п}^{0.25} k_п^{0.25} K_0^{1.5}}{W_к \rho_*^{0.25}} \varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi = \frac{1}{\beta \cos \gamma} \left( \frac{K_{0н}}{K_0} \right)^{1.5}$  — угловой коэффициент,

определяющий влияние угла падения капли. Величина постоянного коэффициента найдена на основе анализа экспериментальных данных по форсуночному охлаждению непрерывнолитых слитков [2] и составляет  $C = 2.5$ .

На рис. 2 приведены зависимости относительного изменения тепловосприятия (по отношению к тепловосприятию при нормальном соударении) от угла падения капли для различных значений числа Вебера. Основными факторами, определяющими изменение тепловосприятия капли, являются снижение коэффициента деформации, увеличение толщины парового зазора и времени теплового взаимодействия. При малых значениях критерия Вебера определяющим является увеличение времени теплового взаимодействия и имеет место увеличение тепловосприятия капли. При  $We > 10$  все более существенными оказываются рост толщины зазора и снижение коэффициента деформации и с ростом угла падения происходит снижение тепловосприятия капли. При углах падения менее  $30-40^\circ$  изменение тепловосприятия незначительно.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены уравнения для тепловосприятия капли при косом соударении с охлаждаемой поверхностью с использованием критериев подобия теплового взаимодействия. Касательное взаимодействие можно учесть полученными угловыми коэффициентами. При углах падения капли менее  $40^\circ$  влияние его на тепловосприятие незначительно.

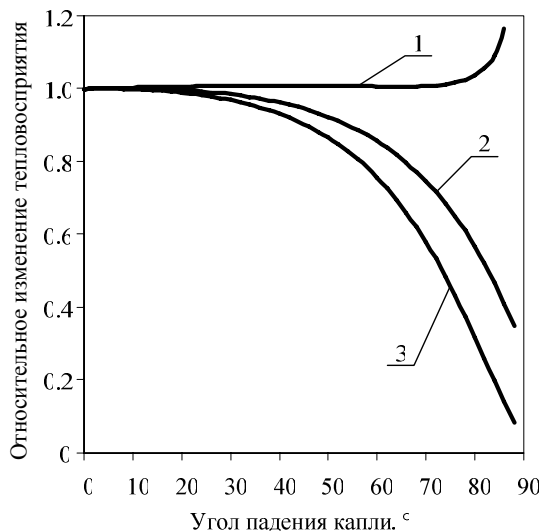


Рис. 2. Относительное изменение тепловосприятости капли: 1 —  $We=10$ ; 2 —  $We=50$ ; 3 —  $We=100$

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  
 $C$  – постоянный коэффициент;  
 $d$  – диаметр, м;  
 $i$  – энтальпия, Дж/кг;  
 $K$  – коэффициент деформации;  
 $R$  – радиус капли, м;  
 $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  
 $t$  – температура, °С;  
 $W$  – скорость капли, м/с;  
 $We$  – критерий Вебера;  
 $Re$  – критерий Рейнольдса;

$Pt$  – критерий Прандтля;  
 $\beta$  – коэффициент;  
 $\gamma$  – угол между скоростью капли и нормалью к поверхности;  
 $\delta$  – толщина паровой прослойки, м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $m^2/c$ ;  
 $\rho$  – плотность,  $kg/m^3$ ;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение капли, Н/м;  
 $\tau$  – время, с;  
 $\upsilon$  – температурный напор, К;  
 $\varphi$  – угловой коэффициент.  
 Индексы:  
 $r$  – радиальная составляющая скорости;  
 $k$  – капля;  
 $n$  – нормальная составляющая скорости;  
 $p$  – пар;  
 пов – поверхность;  
 ср – средний;  
 $\tau$  – касательная составляющая скорости;  
 0 – полная деформация;  
 \* – условный параметр.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исаченко В.П.**, Кушнырев В.И. Струйное охлаждение. М.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
2. **Динер А.** Обзор литературы по теплоотдаче при струйном охлаждении // Черные металлы, 1976. №4. С. 26—29.
3. **Форсуночное** охлаждение высокотемпературных поверхностей / Л.И. Урбанович, В.А. Горяинов, В.В. Севостьянов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1981. №3. С. 156—160.