



ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЖИДКОСТНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ПЛОСКОГО ВЕРТИКАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОГО ГУММИРОВАННОГО ОБЪЕКТА

Проведены исследования теплообмена при жидкостном охлаждении плоского вертикально расположенного гуммированного объекта. Установлены основные характерные особенности изучаемого процесса, проведена оценка влияния отдельных определяющих параметров на интенсивность теплоотдачи для дальнейших экспериментальных исследований, предназначенных для разработки практических обобщенных рекомендаций.

Теплообмен, гуммирование, плотность, теплоемкость, динамическая вязкость, коэффициент теплопроводности, охлаждение.

При подаче струи жидкости на гуммированную поверхность образуется пленка жидкости. Процессам гидродинамики и теплообмена при течении жидкостей в тонких пленках посвящено много теоретических и экспериментальных исследований [3]. Особенность пленки, образованной струей капель, состоит в том, что капли непрерывно возмущают пленку, вместе с тем внося в нее жидкую массу. Интенсивность теплообмена зависит от следующих факторов:

- плотность потока жидкости (плотность орошения),
- скорость капель,
- функция распределения капель по размерам,
- угол между направлением движения капель и поверхностью пленки (угол атаки) и т.п.

Исследования теплообмена при жидкостном охлаждении гуммированного объекта ведутся, как правило, в двух направлениях – охлаждение плоского горизонтально и вертикально расположенного гуммированного объекта.

При охлаждении **плоского вертикально расположенного гуммированного объекта** направление потока капель относительно гравитационной пленки может быть различным: нормальным к направлению течения (рис. 1а), спутным (рис. 1б), противоточным (рис. 1в). Режим течения пленки также может быть различным. Он будет устанавливаться под влиянием воздействия капель. Спутная струя может вносить в пленку импульс, ускоряющий пленку. При этом ускорение будет зависеть от угла атаки – при малых углах φ возможно существенное ускорение и повышение интенсивности теплоотдачи.

При орошении пленки конусной струей угол атаки неодинаков для различных капель (рис. 1г), что усложняет процесс и приводит к неравномерному

воздействию струи на пленку. При орошении горизонтальной поверхности охлаждающей жидкостью снизу (потолочное расположение) также возможно образование пленки, отвод жидкости из которой осуществляется периодически срывающимися каплями (рис. 1д). Характер взаимодействия системы капель с пленкой зависит также от соотношения размеров капель и толщины пленки. В частности, при стекании пленки вдоль вертикальной поверхности при достаточно низкой температуре (отсутствие кипения в пленке) интенсивность процесса будет определяться преобладающим влиянием гидродинамических факторов: процессом течения пленки и динамическим воздействием капель. Здесь возможны три варианта:

- капли «мягко» оседают на поверхность пленки, обеспечивая только приток массы;
- капли турбулизируют поверхностный слой пленки;
- капли с достаточным импульсом проникают сквозь пленку, достигая твердой поверхности теплообмена. Механизм теплообмена и динамики в таких пленках будет различным и зависящим от степени внешнего воздействия.

Экспериментальные исследования влияния угла падения струи жидкости и расхода воды на коэффициент теплоотдачи проводились на установке, принципиальная схема которой аналогична установке в работе [3].

Основной частью экспериментальной установки является рабочий участок, представляющий собой гуммированную пластину. В эксперименте использовались резинометаллические образцы с обкладками из резины на основе НК+СКБ марки 2566 толщиной $\delta_{об} = 4,5$ мм, в качестве основы использовалась сталь марки Ст3 при толщине стального слоя $\delta_{ст} = 2$ мм.

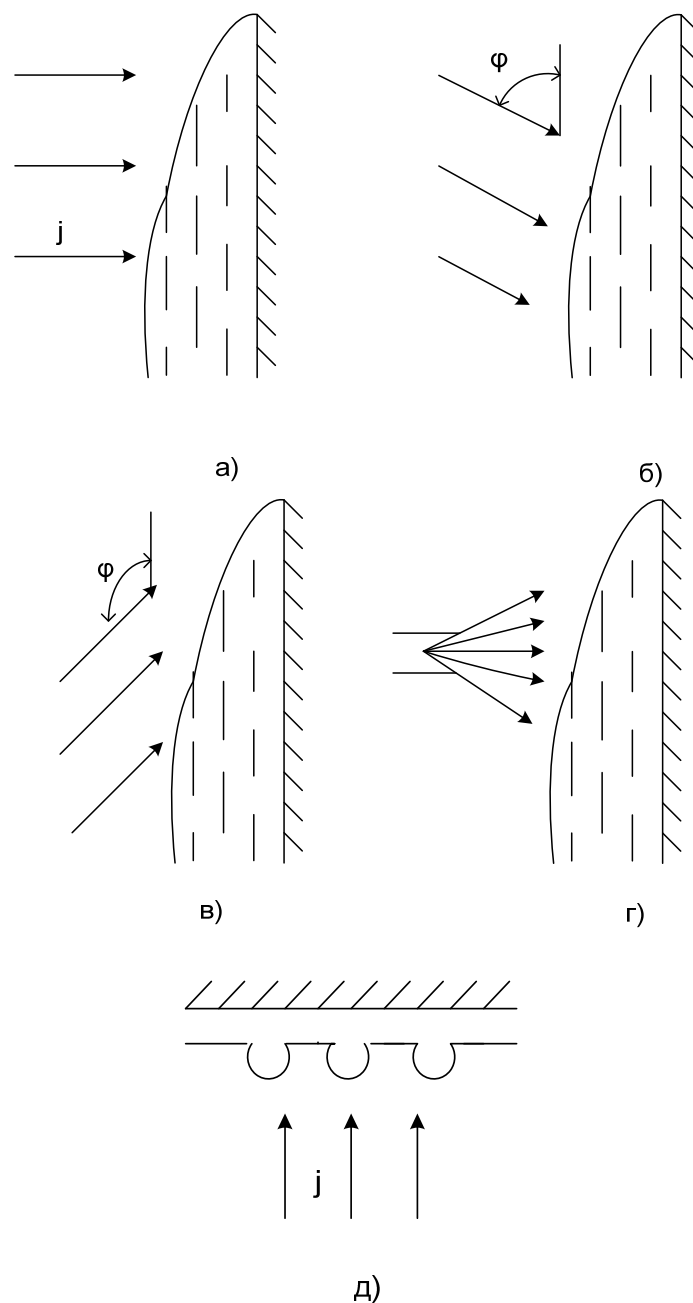


Рис. 1. Схема взаимодействия потока капель с пленкой на охлаждаемой поверхности при различном направлении потока (j – плотность орошения):
 а – нормальное к направлению течения пленки; б – спутное; в – противоточное;
 г – орошение конусной струей; д – потолочное расположение (жидкость подается снизу на горизонтальную поверхность)

Пластина крепилась к задней стенке камеры размерами $880 \times 500 \times 400$ мм, изготовленной из листовой нержавеющей стали толщиной 3 мм, имеющей окна для освещения и визуального наблюдения процесса. Обеспечивалась герметичность крепления пластины к стенке, а также гидро- и теплоизоляция задней поверхности пластины. Пластина в камере охлаждалась диспергированной водой, подаваемой из центробежной форсунки. Рабочий участок нагревался электрическим током от понижающего трансформатора, вода в форсунке (диаметр сопла 4 мм) подавалась из расходного бака вихревым насосом через коллектор и расходомерную диафрагму.

Отсекающая диафрагма ограничивает факел распыляемой жидкости до пределов рабочего участка.

В ходе эксперимента измерялись локальные и полные значения тепловыделения, температура пластины, местные плотности потока орошения, а также расход воды, попадающей на пластину, температура воды при выходе из форсунки и среды в камере.

Цель исследования заключалась в том, чтобы установить основные характерные особенности изучаемого процесса, оценить влияние отдельных определяющих параметров на интенсивность теплоотдачи и на основании полученных результатов разработать методику дальнейших экспериментальных исследова-

ний, предназначенных для разработки практических обобщенных рекомендаций.

В исследовании анализировалась локальная теплоотдача от вертикальной поверхности с температурой 423÷473 К к воде с температурой 277÷287 К, подаваемой из центробежно-струйной форсунки по нормали к поверхности или под углом 65 и 15° сверху.

В качестве показателя интенсивности процесса использовался коэффициент теплоотдачи, определяемый выражением

$$\bar{\alpha}(x) = \frac{\bar{q}(x)}{[\bar{T}_c(x) - T_{0ж}]},$$

где сглаженное значение температуры охлаждаемой поверхности –

$$\bar{T}_c(x) = \frac{1}{x} \int_0^x T_c(x) dx,$$

где $T_c(x)$ – определенная в опыте температура поверхности; $q(x)$ – локальное значение плотности теплового потока; $T_{0ж}$ – температура воды на выходе из форсунки (которая согласно проведенной ранее оценке незначительно отличалась от средней температуры капель, поступающих в пленку).

Теплоотдача в рассматриваемом процессе определяется совокупностью величин, которые условно можно разделить на две группы: относящиеся к пленке и относящиеся к потоку капель.

К первой группе относятся физические параметры жидкости: плотность (ρ), теплоемкость (c_p), динамическая вязкость (μ), коэффициент теплопроводности (λ), ускорение силы тяжести (g), координата x сечения, для которого определяется коэффициент теплоотдачи. Ко второй группе относятся параметры, характеризующие поток капель: плотность орошения (j), скорость капель (ω_k), средний радиус капель (R_{03}), угол атаки струи капель (φ). Силовое взаимодействие капель с поверхностью пленки предполагает учет влияния на теплоотдачу коэффициента поверхностного натяжения (σ). Таким образом, имеем зависимость

$$\bar{\alpha} = f(\rho, \mu, c_p, \lambda, g, x, j, \omega_k, R_{03}, \varphi, \sigma).$$

В соответствии с этой функциональной зависимостью выбирались семь чисел подобия, используемые при обобщении результатов и аппроксимации данных по теплоотдаче в области отсутствия влияния теплового потока по теплоотдаче к пленке, а также характерные особенности данного процесса [1, 2]:

- Нуссельта (Nu), учитывающее размер жидкой пленки;
- Рейнольдса (Re), учитывающее скорость жидкости в пленке (ω) и толщину пленки (δ);
- Вебера (We), учитывающее локальные значения плотности орошения;
- Фруда (Fr), отражающее воздействие капель на пленку при различных углах атаки;
- Галилея с координатой Ga_x и радиусом капли Ga_R , которые трактуются как условные геометрические симплексы, составленные из двух указанных размеров и линейного масштаба;
- Прандля (Pr), отражающее влияние угла атаки для различных режимов.

Три числа подобия Re , We и Fr отражают соотношение между четырьмя силами, актуальными для динамики рассматриваемого процесса: инерционными

ми, силами вязкого трения, тяжести и поверхностного натяжения.

Экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью

$$Nu = C_\varphi Re^{-0,25} We^{1,33-1,25 \cos \varphi} Fr^{0,75 \cos \varphi} Ga_R^{0,33} Ga_x^{-0,17} Pr^{0,5} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,2}, \quad (1)$$

значение константы C_φ зависит от угла φ . Так, при $\varphi = 90^\circ$, $C_\varphi = 3,36 \cdot 10^8$, при $\varphi = 60^\circ$, $C_\varphi = 5,10 \cdot 10^3$, при $\varphi = 15^\circ$, $C_\varphi = 4,30 \cdot 10^{-2}$.

Отклонение экспериментальных точек происходит в зависимости от чисел Re , We и угла атаки струи. Связь числа Re как критерия режима течения с числом We выглядит следующим образом:

$$Re = kWe^{0,73} \cdot 10^7,$$

здесь $k = 0,31$ и $0,22$ для $\varphi = 90$ и 60° соответственно.

Большому значению числа We соответствует более высокое «критическое» значение числа Re при одном и том же угле атаки. Что касается влияния угла атаки на процесс перехода к псевдотурбулентному режиму течения, то здесь трудно сделать достаточно обоснованное заключение из-за недостатка информации, содержащейся в экспериментальных данных. Можно лишь отметить тенденцию, которая выражается в необходимости создать более высокое значение потока жидкости в струе для получения заданного «критического» значения числа Re при уменьшенном угле атаки; эта тенденция в особенности явно проявляется при больших значениях расхода.

Находящаяся под воздействием ядра струи верхняя половина пластины покрыта в этом случае интенсивно возмущенной пленкой (теплоотдача здесь существенно выше, чем на нижней половине), но эти возмущения, по-видимому, затухают по мере движения пленки вниз; в этом случае для перехода к псевдотурбулентному режиму нужно увеличить подачу жидкости (или повернуть ось струи ближе к нормали).

Пределы изменения определяющих чисел подобия в экспериментах:

$$\begin{aligned} 10 &\leq Re \leq 545, \\ 1,5 \cdot 10^{-7} &\leq We \leq 2,6 \cdot 10^{-5}, \\ 4,13 \cdot 10^4 &\leq Fr \leq 11,8 \cdot 10^4, \\ 21 &\leq Ga_R \leq 53, \\ 4,6 \cdot 10^8 &\leq Ga_x \leq 9,12 \cdot 10^{11}. \end{aligned}$$

В качестве характерной температуры принималась температура жидкости на выходе из форсунки ($T_{0ж}$) – эта величина незначительно изменялась в опытах. Число Pr_c соответствовало средней температуре поверхности стенки на участке пластины длиной x .

Константы C_φ в формуле (1) существенно различаются для углов $\varphi = 90$, 65 и 15° , однако величина $\cos \varphi$, введенная в формулу (1), позволяет рассчитать теплоотдачу в промежуточных зонах ($90^\circ > \varphi > 65^\circ$ и $65^\circ > \varphi > 15^\circ$) по двум «смежным» константам C_φ и тем самым оценить значение коэффициента теплоотдачи в данной промежуточной зоне.

Как уже отмечалось, при температуре орошаемой поверхности пластины $T_c \approx 333$ К (что соответствует температурному напору в эксперименте, равному примерно 323 К) происходит существенное изменение процесса: возникает влияние на теплоотдачу теплового потока (или температурного напора). Если зафиксировать

все упоминавшиеся ранее факторы, определяющие интенсивность теплоотдачи, и осуществлять режимы с постепенно нарастающим тепловым потоком, то коэффициент теплоотдачи также будет увеличиваться. Эффект этот меняется для различных углов атаки струи, а также зависит от массового расхода жидкости в струе.

Возрастание теплоотдачи при увеличении теплового потока имеет место при пузырьковом кипении жидкости. Можно предполагать, что в пленке возникает «раннее» кипение, несмотря на то, что температура стенки ниже температуры насыщения. Это возможно при локальных понижениях давления до давления насыщения при температурах в пристенной области около 333 К и выше (для 333 К давление насыщения воды составляет примерно 0,02 МПа). Как уже отмечалось, понижение давления может происходить в результате удара крупных капель, не потерявших скорость в процессе движения от сопла форсунки до пленки; при этом возможны кавитационные эффекты в области растекания жидкости, ударившейся о стенку капли (для струи идеальной жидкости скорость растекания равна скорости движения до удара).

Расчет теплоотдачи по модели прогрева пленки показывает, что в условиях эксперимента пленка прогревается практически полностью (время прогрева пренебрежимо мало по сравнению с временем пробега пленки). Коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по такой модели, падает вдоль поверхности, и теплоотдача ниже, чем регистрируемая в опытах. Таким образом, модель прогрева ламинарной пленки не объясняет ни характера изменения теплоотдачи вдоль поверхности, ни высокой интенсивности процесса теплообмена. Следовательно, одного эффекта осаждения на поверхность пленки холодных капель недостаточно для того, чтобы объяснить интенсивность охлаждения поверхности струей диспергированной жидкости.

Ударная модель. Проанализируем теплообмен пленки, созданной и возмущаемой крупными каплями (рис. 2). Количество капель, падающих в единицу времени на единицу поверхности (плотность счетного потока), можно оценить через плотность орошения:

$$n = \frac{j}{m_i},$$

где $m_i = \frac{4}{3}\pi\rho\bar{R}_{03}^3$ – это средняя масса одной капли.

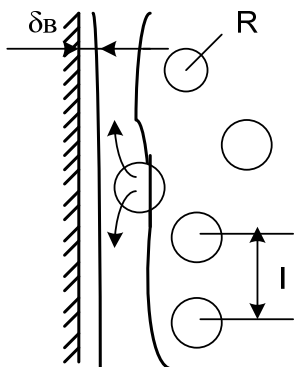


Рис. 2. Схема орошения для «ударной» модели

Если расстояние между каплями в потоке равно l , то период падения можно представить в виде $\Delta\tau = l/\omega_k$.

Для оценки толщины вязкого подслоя используется соотношение

$$\delta_b/\lambda \sim 5\sqrt{v/(\omega_k l)}, \quad (2)$$

где

$$l/\omega_k = \Delta\tau = 1/(n\omega_k^2)^{1/3}. \quad (3)$$

С учетом (3) для толщины вязкого подслоя можно записать:

$$\delta_b = 5\sqrt{\frac{v\left(\frac{4}{3}\pi\bar{R}_{03}^3\right)\rho^{1/3}}{\omega_k^{2/3}j^{1/3}}}. \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи для такой модели $\alpha \sim \lambda/\delta_b$.

С учетом соотношения для вязкого подслоя выражение для коэффициента теплоотдачи принимает вид

$$\alpha \approx 0,2\sqrt{\frac{\lambda^2\omega_k^{2/3}j^{1/3}}{\bar{R}_{03}v\rho^{1/3}}}. \quad (5)$$

Из последнего соотношения следует, что коэффициент теплоотдачи (α) пропорционален плотности орошения (j) в степени 1/6 и скорости каплей (ω_k) в степени 1/3. Если допустить, что форсунка дает равномерный факел по всем направлениям, то неравномерность плотности потока в факеле форсунки объясняется неоднородностью поля скоростей. Такое предположение позволяет считать, что скорость капли пропорциональна плотности орошения. Тогда из соотношения (5) следует $\alpha \sim j^{1/3}$. При прочих равных условиях интенсивность теплоотдачи должна возрастать с увеличением плотности орошения.

Расчеты по ударной модели позволяют достаточно верно в среднем описать изменение коэффициента теплоотдачи для направления струи, нормального относительно поверхности ($\varphi = 90^\circ$).

Для угла атаки $\varphi = 15^\circ$ такая модель дает заметное занижение коэффициента теплоотдачи по сравнению с экспериментом в верхней части пластины, что, вероятно, является следствием того, что для $\varphi = 15^\circ$ можно предполагать наличие более энергичных крупных капель, которые по импульсу превосходят принимавшиеся в модели. Заметное расхождение с экспериментом, которое дает ударная модель для коэффициента теплоотдачи в нижней части пластины, можно объяснить тем, что пленка уже достаточно толстая и ослабляет ударные эффекты.

Литература

- Осипов, Ю. Р. Физико-математический анализ тепловых режимов термообработки гуммированных покрытий / Ю. Р. Осипов, Т. А. Рожина // Техника и технология. – 2005. – № 3 (9). – С. 51–54.
- Осипов, Ю. Р. Решение краевой задачи нестационарной теплопроводности при предварительной обработке многослойных эластомерных материалов / Ю. Р. Осипов, Т. А. Рожина, С. Ю. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. – Москва : ВИМИ. – 2005. – № 6. – С. 35–40.
- Осипов, Ю. Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов / Ю. Р. Осипов. – Москва : Машиностроение, 1995. – 232 с.

N.A. Bormosov, T.A. Kochkareva, A.Y. Belyanina
Vologda State University

**STUDY OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER DURING LIQUID COOLING
OF A FLAT VERTICALLY LOCATED RUBBERIZED OBJECT**

Studies of heat exchange during liquid cooling of a flat vertically located rubberized object have been carried out. The main characteristic features of the studied process are defined, the influence of separate major parameters on heat transfer intensity for the further experimental researches intended for development of the practical generalized recommendations is estimated.

Heat transfer, rubberization, density, heat capacity, dynamic viscosity, thermal conductivity, cooling.