

ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОТ РЕЖИМНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

*Д-р техн наук, проф. Э. Г. БРАТУТА, инж. Ю. А. СЕЛИХОВ,
канд физ.-мат. наук Т. И. ЯРОШЕНКО, инж. Т. Б. ПОДВАЛЬНАЯ*

Изложены результаты экспериментального исследования взаимосвязанного влияния плотности орошения, скорости и угла натекания диспергированной жидкости на уровень критической температуры в условиях нестационарного охлаждения высокотемпературной поверхности.

Область перехода от пленочного к пузырьковому режиму кипения широко изучалась при исследовании теплообмена и процесса генерирования пара в трубах и каналах различной формы. Наряду с этим кризисные явления при охлаждении высокотемпературных поверхностей диспергированной жидкостью практически не изучены. Вместе с тем надежное определение режимов теплового взаимодействия нагретой поверхности и охладителя, когда резкое изменение температуры металла, а следовательно, термические напряжения приводят к появлению трещин и других дефектов, весьма актуально для целого ряда объектов машиностроения.

На первом этапе исследования нами была установлена зависимость критической плотности теплового потока $q_{кр}$ и критической температуры поверхности $T_{кр}$ в функции плотности орошения g [1], а также степени недогрева жидкости ΔT_n до температуры насыщения [2].

Ввиду различных возможных способов охлаждения поверхности распыленной жидкостью, были проведены эксперименты, в которых величина $T_{кр}$ исследовалась в зависимости от скорости W и угла натекания δ капельной среды на поверхность при различных плотностях орошения.

Как и в [1, 2], нами использована методика определения локальных (а не осредненных по поверхности) условий теплообмена (достаточно подробно описана в [3]), позволившая исключить влияние целого ряда таких частных характеристик эксперимента, как тип распылителя, расстояние его от охлаждаемой поверхности, напор жидкости перед распылителем и способ диспергирования жидкости.

В экспериментах был использован водовоздушный поток, полученный в разгонном сопловом аппарате. Измеряя дисперсный состав распыленной жидкости с помощью счетно-импульсного метода [4], мы установили, что модельный диаметр капель дифференциальной функции распределения объемов капель по диаметрам изменялся от 30 до 80 мкм при скорости натекания на охлаждаемую поверхность от 10 до 40 м/с.

Плотность орошения измерялась с помощью того же счетно-импульсного метода [4] и варьировалась от 0,30 до 8,86 кг/(м²·с). Угол δ изменялся в опытах от 10 до 90 град. Во всех экспериментах температура диспергированной жидкости составляла от 18 до 21°С. Шероховатость охлаждаемой поверхности — Rz 40.

В соответствии с нашей работой [3] исходной информацией, необходимой для идентификации граничных условий теплообмена, является экспериментально полученная зависимость температуры от времени в некоторой точке тела термозонда, удаленной на 5 мм от охлаждаемой поверхности (кривая 1, рис. 1). В результате решения обратной задачи

теплопроводности восстанавливались величины температуры поверхности (кривая 2) и плотности теплового потока (кривая 3). В качестве критической температуры поверхности $T_{кр}$ принималось ее значение, соответствующее максимуму плотности теплового потока $q_{кр}$.

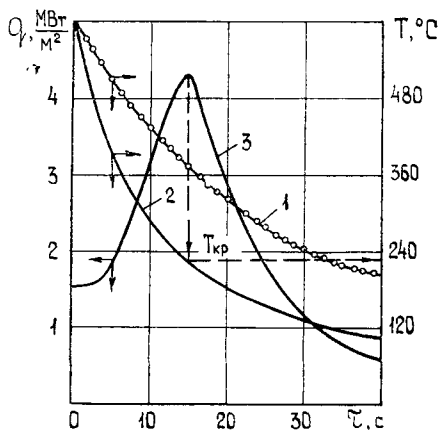


Рис. 1. Исходные данные для определения критической температуры поверхности

обмена оптимальным вариантом разрешения этой задачи в указанной постановке было использование метода планирования эксперимента.

Из известных методик планирования эксперимента был выбран метод Бокса и Бенкена [5], позволяющий получить высокую достоверность результатов обобщения при минимальном числе одиночных опытов, каждый из которых соответствует определенному сочетанию уровней влияющих факторов. К тому же погрешности аппроксимации минимальны, что заложено непосредственно в алгоритме метода.

В соответствии с указанным планом была составлена матрица, включающая 13 отдельных экспериментов, в каждом из которых искомые значения $T_{кр}$ находились в функции g , W_c и δ_c при определенном сочетании минимального, среднего и максимального уровней указанных факторов.

Расчетно-экспериментальные данные, аналогичные показанным на рис. 1 и полученные в уже отмеченном диапазоне изменения плотности орошения, скорости и угла натекания капель на поверхность, составляли массив информации, введенной в матрицу планирования эксперимента. В результате было получено корреляционное уравнение второго порядка

$$t_{кр}(X_1, X_2, X_3) = A_0 + \sum_{j=1}^3 A_j X_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 A_{ij} X_i X_j, \quad (1)$$

где X_1 , X_2 и X_3 — величины, связанные с определяющими факторами уравнениями вида

$$X_1 = (g_{max} - g_{min})^{-1} [2g - (g_{max} + g_{min})], \quad (2)$$

$$X_2 = (W_{max} - W_{min})^{-1} [2W - (W_{max} + W_{min})], \quad (3)$$

$$X_3 = (\delta_{max} - \delta_{min})^{-1} [2\delta - (\delta_{max} + \delta_{min})], \quad (4)$$

при этом $g_{min} = 0,30$ кг/(м²·с), $g_{max} = 8,86$ кг/(м²·с), $W_{min} = 10,5$ м/с, $W_{max} = 40,4$ м/с.

Анализ результатов предварительно поставленных опытов позволил обнаружить, что степень влияния плотности орошения, скорости и угла натекания капель на величину $T_{кр}$ в существенной мере определяется сочетанием уровней каждого из указанных факторов. Нами установлено, что имеющиеся в литературе противоречивые сведения об условиях теплообмена распыленной жидкости с поверхностью обусловлены, в основном, недостатками методик экспериментов, в которых процесс теплообмена изучался без учета взаимосвязанного влияния определяющих факторов. Поэтому для установления закономерности вида $T_{кр}(g, W, \delta)$ с учетом взаимного влияния g , W и δ на условия тепло-

Было установлено, что в связи с нелинейной зависимостью плотности теплового потока от угла натекания капель минимальная погрешность аппроксимации опытных данных с помощью (1) возможна лишь в случае, когда реализация плана эксперимента осуществляется не для всего диапазона углов натекания δ от 10 до 90 градусов, а для двух отдельных интервалов: $\delta_{\min 1} = 10$ град, $\delta_{\max 1} = 30$ град и $\delta_{\min 2} = 30$ град, $\delta_{\max 2} = 90$ град. Для каждого из указанных интервалов в соответствии с методикой [5] были найдены коэффициенты A_0, A_j и A_{ji} из (1), представленные в таблице.

Таблица

Коэффициенты корреляционного уравнения (1)

δ , град	A_0	A_1	A_2	A_3	$A_{1,1}$	$A_{2,2}$	$A_{3,3}$	$A_{1,2}$	$A_{1,3}$	$A_{2,3}$
10...30	245	7,3	-12,9	17,6	5,1	9,9	-5,6	-12,5	9,5	23,3
30...90	278	-3,1	24,1	11,0	16,3	-18,1	-4,4	6,3	-7,5	-29,5

Таким образом, уравнение (1) позволяет определить критическую температуру поверхности в функции взаимосвязанного влияния плотности орошения, скорости и угла натекания среды. Сопоставление результатов эксперимента с данными вычислений по (1), показало, что максимальная погрешность аппроксимации не превышает 7%.

В связи с тем, что трехмерное графическое отображение характера функции $T_{кр}(g, W, \delta)$ оказалось весьма громоздким, на рис. 2 с целью иллюстрации фрагмента указанной закономерности представлено несколько кривых. Цифры на кривых соответствуют плотности орошения, сплошные линии относятся к результатам, полученным при $\delta = 90$ град., штриховые линии — зависимости, установленные при $\delta = 10$ град.

В рамках публикуемой работы результаты специальных теплофизических исследований, направленных на изучение природы и причин, обусловивших характер полученной зависимости $T_{кр}(g, W, \delta)$ не приводятся. Поэтому априорное (в указанном смысле) обсуждение результатов мы не сочли полезным. Основные выводы сводятся к следующим положениям.

1. Областью практического применения полученных закономерностей являются процессы нестационарного охлаждения элементов конструкций распыленной жидкостью, когда начальная температура поверхности превышает уровень критической температуры. Многочисленные опыты и расчеты по (1) показали, что в оговоренном ранее диапазоне изменения g, W и δ максимальное значение $T_{кр} = 310^\circ \text{C}$, а минимальное $t_{кр} = 230^\circ \text{C}$. Указанные пределы $T_{кр}$ при известной начальной температуре поверхности конкретного инженерного объекта определяют воз-

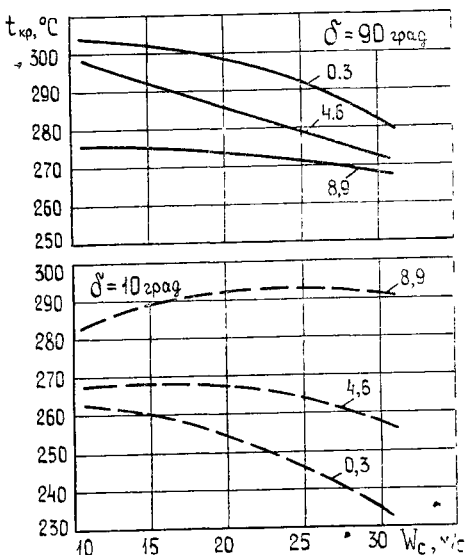


Рис. 2. Зависимость критической температуры поверхности от плотности орошения, скорости и угла натекания

можное наступление (или отсутствие) кризиса теплообмена и целесообразность обращения к (1).

2. Полученные зависимости $T_{кр}(g, W, \delta)$ позволяют обоснованно назначать режимные и геометрические характеристики системы охлаждения и тем самым минимизировать возможные термические напряжения и деформации в охлаждаемых элементах конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братута Э. Г. Кризис теплообмена при охлаждении поверхности диспергированной жидкостью // Известия вузов. Энергетика. — 1986. — № 6.
2. Братута Э. Г., Кравцов С. Ф. Влияние подогрева диспергированной жидкости на критический тепловой поток при охлаждении плоской поверхности // Теплоэнергетика. — 1986. — № 12.
3. Метод определения локальных условий теплообмена при спрейерном охлаждении / Братута Э. Г., Кравцов С. Ф., Селихов Ю. А. и др. // Сталь. — 1985. — № 4.
4. Братута Э. Г. Диагностика дисперсных потоков при внешних воздействиях. — Харьков; Вища школа, 1987.
5. Вох Е. Р., Вейнкен Д. М. // Technometrics. — 1960. — Vol. 2. — N 4.

Статья поступила 25 марта 1988 г.