

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С. Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции. Изв. АН СССР, ОТН, 1951, № 4.
2. Van Wijk W. R., Vos A. S., Van Stralen S. J. D. Heat transfer to boiling liquid mixtures. Chem. Eng. Sci., 1956, vol. 5.
3. Van Stralen S. J. D. Heat transfer to boiling binary liquid mixtures. British chemical Engineering. January, 1959.
4. Bonilla C. F. and Perry C. W. Heat transfer to boiling liquid mixtures. Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., 1951, vol. 37.
5. Фастовский В. Г., Артым Р. И. Экспериментальное исследование критической тепловой нагрузки при кипении бинарных смесей. Теплоэнергетика, 1958, № 8.
6. Кутателадзе С. С. и Боршанский В. М. Справочник по теплопередаче, Госэнергоиздат, 1959.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ К КИПЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

В. В. Гусев, А. И. Приданцев, А. Н. Соловьев

(Москва)

Определение коэффициента теплоотдачи к кипящей жидкости обычно связано с рядом трудностей, которые обусловлены, отчасти, большой неточностью в определении температуры теплоотдающей поверхности. Последнее особенно существенно при исследовании кипения расплавленных металлов. В этом случае становится значительной поправка на «глубину заделки», которая складывается из перепада температур в стенке и разницы температур, обусловленной деформацией температурного поля в связи с наличием в стенке датчика температуры с его изоляцией и т. п. Если первую часть поправки легко вычислить при известном расстоянии спая термопары от теплоотдающей поверхности и известном коэффициенте теплопроводности материала стенки, то в реальных случаях вычисление второй части поправки практически возможно с точностью лишь до одного порядка. Заметим, что и первая часть поправки не может быть вычислена с погрешностью менее 20–30%, так как при исследованиях в области высоких температур приходится применять термопары со спаем величиной от 0.3 до 0.6 мм, и только с такой же точностью можно определить глубину заделки. На фиг. 1 приведены для иллюстрации кривые поправки на глубину заделки для теплоотдающей поверхности из нержавеющей стали ($\lambda = 14$ ккал/мчас°С, $\delta = 1$ мм) в зависимости от теплового потока. На этой фигуре приведена кривая рабочей разности температур. Как видно, эти величины становятся одинаковыми уже при потоке $q \approx 10^5$ ккал/м²час.

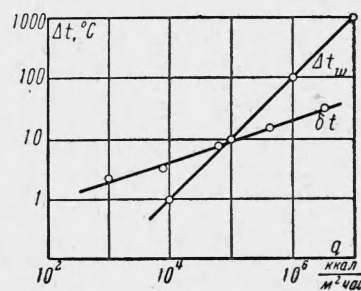
В предлагаемой работе сделана попытка показать возможность определения коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме при непрерывном линейном нарастании или (уменьшении) теплового потока. При этом время проведения опыта сокращается в несколько раз, что позволит проводить исследования в сильно корродирующих жидкостях и при высоких температурах. Последнее дает возможность применять материалы с большой теплопроводностью и тем самым резко уменьшать поправку на глубину заделки, которая может быть надежнее определена.

1. Описание метода. Как показано многочисленными исследователями [1] в зоне пузырькового кипения для коэффициента теплоотдачи справедлива степенная зависимость

$$\alpha = Cq^n \quad (1.1)$$

Рабочая разность температур будет равна

$$t_w - t_f = \frac{q}{\alpha} = \frac{1}{C} q^{1-n}$$



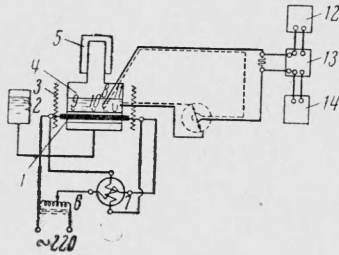
Фиг. 1

Так как температура стенки (t_w) измеряется не на поверхности, а на некотором расстоянии δ от нее (t_{w1}), то вводится поправка; тогда

$$t_{w1} - t_f = \Delta t_{w1} = \frac{1}{C} q^{1-n} + \frac{\delta}{\lambda} q$$

или

$$\Delta t_{w1} = K_1 q^m + K_2 q = \varphi(q) \quad (1.2)$$



Фиг. 2

Для простоты записана поправка только на глубину заделки (и для плоской стенки). Однако поправка на искажение поля температуры за счет изоляционных вкладышей термопар, как показано в [2], также пропорциональна тепловому потоку, поэтому можно считать, что она входит в коэффициент K_2 .

Если удастся в опыте получить зависимость $\Delta t_{w1} = \varphi(q)$, то из нее можно тем или иным способом определить все три коэффициента, т. е. K_1 , K_2 и m . В этом и заключается существо метода. Изменяя непрерывно тепловой поток и измеряя Δt_{w1} , можно получить искомую зависимость. Все эти рассуждения справедливы при следующих условиях:

- (1) Коэффициенты K_1 , K_2 и m — постоянны.
- (2) Тепловой поток на теплоотдающей поверхности равен измеряемому тепловому потоку (нет существенного запаздывания).
- (3) При выбранной скорости нарастания теплового потока будет успевать формироваться пограничный слой, т. е. будет успевать устанавливаться значение Δt_{w1} , как в стационарных условиях.

Как показано многочисленными опытами с различными жидкостями в широком интервале изменения теплового потока, зависимость между a и q может быть хорошо интерполирована, если коэффициенты принять постоянными.

Были проведены оценки выполнимости условия (2). Если принять, что тепловой поток изменяется во времени линейно: $q = q_0 + bt$ со скоростью $b = 5 \cdot 10^4$ ккал / м²час², то для стальной стенки толщиной 2 мм уже через несколько минут после начала нагрева тепловой поток через поверхность будет отличаться от подаваемого потока на доли процента.

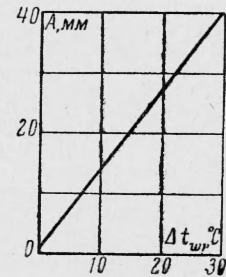
Условие (3) может быть проверено при проведении экспериментов с различными скоростями изменения теплового потока.

2. Экспериментальная проверка метода. Для проверки изложенной методики были проведены эксперименты на двух различных установках. Исследовалось кипение воды в большом объеме на горизонтальной трубке длиной $l = 300$ мм и диаметром $D = 26$ мм (и на вертикальной трубке длиной $l = 110$ мм и диаметром $D = 15$ мм).

Принципиальная схема одной из установок приведена на фиг. 2, где 1 — нагревательный стержень, 2 — измерительный бак, 3 — компенсационный нагреватель, 4 — рабочий объем, 5 — конденсатор, 6 — регулятор напряжения, 7 — ваттметр, 8 — термопара в жидкости, 9, 10, 11 — термопары на трубке, 12 — блок питания, 13 — фотокомпенсационный усилитель, 14 — самописец.

Источником теплового потока в обоих случаях был силиконовый стержень, помещенный на оси трубки. Передача тепла осуществлялась лучеиспусканием. Мощность измерялась ваттметром класса 0.5. Разность температур измерялась дифференциальными термопарами в комплекте с фотокомпенсационным усилителем постоянного тока типа Ф16 с самописцем Н16 или ЭПП-09М. До проведения опыта производилась градуировка шкалы Н16. При этом спай термопары, измеряющей температуру в объеме жидкости, помещался в термостат, температура которого изменялась ступенями, а температура в объеме жидкости поддерживалась постоянной.

В маленькой установке имелась возможность вынуть всю рабочую трубку и поместить ее в другой термостат. Температура в термостатах измерялась ртутными термометрами с ценой деления 0.1° С, а в случае большой установки — платина-платинородиевой термопарой в комплекте с потенциометром типа ПМС-48 (на фиг. 3 показан один из градуировочных графиков). Опыты по измерению теплоотдачи проводились следующим образом: установка тщательно промывалась, заполнялась дистиллированной водой и выдерживалась в режиме кипения в течение нескольких часов. Устанавливалась начальная тепловая нагрузка $q = 50\,000$ ккал / м²час и выдерживалась в течение 2 час. Затем мощность нагревателя повышалась ступеньками величиной не более 0.01 q_{\max} так, чтобы тепловой поток в среднем изменялся линейно во времени со скоростью $b \approx 5 \cdot 10^4$ ккал / м²час². Разность температур записывалась на ленте Н16. После достижения максимального теплового потока система некоторое время выдер-



Фиг. 3

живалась в этом состоянии и затем мощность нагревателя плавно снижалась с такой же скоростью. На фиг. 4 приведена одна из записей.

3. **Обработка результатов измерений.** По градуировочному графику определялась разность температур и строилась зависимость $\Delta t_{wi} = \Phi(q)$ для каждой термопары (фиг. 5). Из этой зависимости находились коэффициенты K_1, K_2 и m . Были опробованы три различных способа нахождения этих коэффициентов.

(1) На кривой выбираются три точки и из трех уравнений типа

$$\Delta t_{wi} = K_1 q_i^m + K_2 q_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.1)$$

определяются искомые коэффициенты. Для повышения точности берется набор таких «троек».

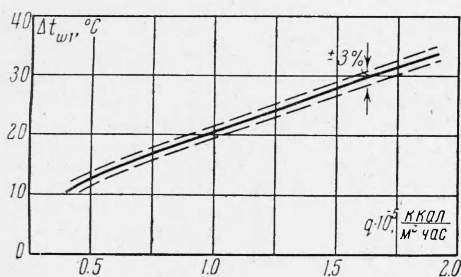
(2) Коэффициенты уравнения определяются методом наименьших квадратов. Для данной функции не удается получить в явном виде выражения для искомых коэффициентов, и они определяются подбором. В частности, уравнение для определения m имеет вид

$$\frac{\sum x_i^{m+1} \sum x_i^m y_i \ln x_i - \sum x_i y_i \sum x_i^{2m} \ln x_i}{\sum x_i^{2m} \sum x_i y_i - \sum x_i^{m+1} \sum x_i^m y_i} = \frac{\sum x_i^{m+1} + \sum x_i^{m+1} \ln x_i - \sum x_i^2 \sum x_i^{2m} \ln x_i}{\sum x_i^{2m} \sum x_i^2 - (\sum x_i^{m+1})^2} \quad (3.2)$$

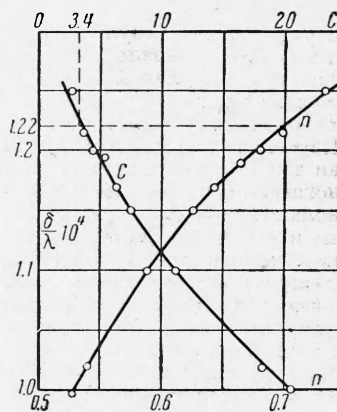
Здесь

$$x_i = q_i \text{ ккал/м}^2\text{час}, \quad y_i = \Delta t_{wi} \text{ }^\circ\text{C} \quad (i = 1, \dots, 10)$$

Как при обработке первым, так и вторым способом сходимость получалась недостаточно хорошей. Частично это может быть отнесено за счет малого интервала тепловых потоков, охваченных в этих опытах. Кроме того, при использовании метода наименьших квадратов приходится учитывать 8-9 знаков, а логарифмы брались по пятизначным таблицам. Следует отметить еще и большую трудоемкость обоих способов. Тем не менее расчеты дают $m = 0.32 \div 0.38$, т. е. близко к тому, что дают другие авторы (следует также учесть, что опыты проводились в начале зоны пузырькового кипения).



Фиг. 5



Фиг. 6

(3) Был применен также графический метод определения коэффициентов. Задавсь некоторым спектром значений K_2 (близких к измеренным величинам δ/λ), из опытных данных можно получить (для данного K_2) значение рабочей разности температур ($t_w - t_f$) и вычислить коэффициент теплоотдачи α в зависимости от теплового потока q . Исходя из (1.1), в логарифмических координатах α и q можно построить прямую и определить значения C и n (т. е. K_1 и m). Таким образом, для различных значений K_2 получаем различные значения C и n . На фиг. 6 представлены эти зависимости для одной из серий опытов на установке с вертикальной трубкой.

На графике видно, что опытные данные могут быть описаны многими различными уравнениями с различной комбинацией K_1, K_2 и n .

Видно также, что наиболее чувствительной к изменению K_2 является величина $K_1 = 1/C$. При изменении K_2 от $1.22 \cdot 10^{-4}$ до $1.18 \cdot 10^{-4}$, т. е. на 3.5%, величина C изменяется от 3.4 до 5.6, т. е. почти в два раза. Показатель степени n изменяется при этом от 0.7 до 0.66, т. е. значительно слабее, чем C .

Таким образом, при $K_2 = 1.22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{час}^\circ \text{С} / \text{ккал}$ получаем зависимость:

$$\alpha = 3.4 q^{0.7} \quad (3.3)$$

Измеренное до опыта значение K_2 равно

$$K_2 = \frac{\delta}{\lambda} = (1.20 \pm 0.25) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{час}^\circ \text{С} / \text{ккал}$$

Всего было проведено десять серий опытов на малой установке и семнадцать серий на большой. Тепловые потоки изменялись от 10 000 до 205 000 $\text{ккал} / \text{м}^2 \text{час}$.

В первых сериях были сделаны опыты с различными скоростями изменения теплового потока. Обнаружено, что при скоростях до $8 \cdot 10^4 \text{ ккал} / \text{м}^2 \text{час}^2$ кривые на нагрев и охлаждение хорошо совпадают между собой. Кроме того, были проделаны опыты при стационарных условиях. При этом точки по $\Delta t_{\text{ст}}$ совпали с точками, полученными в нестационарных условиях. Все это подтверждает мысль об очень быстром формировании теплового пограничного слоя.

Различные опыты проводились в разные дни. Различные серии опытов при этом давали несколько отличные кривые, что может быть объяснено некоторым временным изменением условий кипения в районе спая термомпары. При этом различие по $\Delta t_{\text{ст}}$ не превышало $\pm 10\%$ (по различным термомпарам).

Поступила 22 II 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. К у т а т е л а д з е С. С. Основы теории теплообмена. Госэнергоиздат, 1958.
2. В е с к J. U. Effect of Thermocouple Cavity on Heat Sink Temperature. J. Heat Transfer, 1960, vol. 82, N 1, p. 27—36.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА РТУТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

В. И. Петровичев

(Москва)

Представлены результаты экспериментального исследования локального теплообмена ртути в канале кольцевого сечения с отношением диаметров $d_2/d_1 = 1.67$ и относительной длиной $l/d^0 = 110$. Опытные результаты обработаны в виде зависимости локального безразмерного температурного напора и локального числа Нуссельта от числа Пекле.

Изучению теплообмена при переменном тепловыделении на стенке трубы вдоль потока теплоносителя посвящен ряд работ [1-3]. Некоторые результаты экспериментального исследования теплообмена при турбулентном течении ртути в круглой трубе и в кольцевом канале при синусоидальной тепловой нагрузке по длине канала приведены в работе [4]. В этой работе отмечалось, что переменное тепловыделение вдоль потока теплоносителя может оказать существенное влияние на локальную теплоотдачу в том случае, когда теплоносителями являются расплавленные металлы, обладающие высокими значениями коэффициентов теплопроводности. Обработка экспериментальных результатов в работе [4] была выполнена, однако, лишь в виде зависимости максимальной безразмерной температуры стенки от числа Пекле.

На основании экспериментальных результатов работы [4] был впоследствии сделан расчет локальной теплоотдачи ртути в кольцевом канале для четырех различных сечений канала, результат которого представлен в предлагаемой статье.

Эксперименты проводились на ртутном циркуляционном контуре в опытном теплообменнике кольцевого сечения внутренним диаметром 8.0 мм, наружным 13.4 мм и длиной 600 мм при одностороннем наружном обогреве [4].

Приводим значения или пределы изменения основных величин в опытах

Эквивалентный диаметр канала, мм, $d^0 = 5.4$

Наружный диаметр канала, мм, $d_2 = 13.4$

Внутренний диаметр, мм, $d_1 = 8.0$

Отношение диаметров $d_2/d_1 = 1.67$

Средняя температура ртути, $^\circ\text{С}$ $40 \div 50$

Подогрев ртути в опытном участке, $^\circ\text{С}$ $1.5 \div 4.5$

Максимальный тепловой поток, $\text{ккал} / \text{м}^2 \text{час}$ $26 \cdot 10^3 \div 9 \cdot 10^3$

Максимальный температурный напор, $^\circ\text{С}$ $3.0 \div 1.4$

Число Рейнольдса $R = (10.7 \div 7.7) \cdot 10^3$

Длина участка, мм, $l = 600$

Отношение $l/d^0 = 110$

Скорость ртути, м / сек $0.22 \div 1.55$

Число Пекле $RP = 270 \div 1860$