

экспериментальный метод определения потерь тепла в водяных тепловых сетях. — Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1974, № 8. З. Б е л и н с к и й С.Я., Х а р а з я н Р.С. Исследование процессов аккумуляции тепла в системах теплофикации. — Электрические станции, 1972, № 8.

УДК 621.1.016

В.Ф.Степанчук, В.Ф.Кравец,
Е.Г.Мигуцкий, В.В.Ромейко

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ОДИНОЧНОГО ЦИЛИНДРА В ОБЛАСТИ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ВЫНУЖДЕННОГО И СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ

Наряду с крайними случаями теплообмена при свободном движении, когда определяющим является критерий Грасгофа, и теплообмена при вынужденном движении, когда определяющим является критерий Рейнольдса, значительный интерес для практики представляет теплообмен в некоторой промежуточной области, когда влияние и свободного и вынужденного движения соразмерно. При этом

$$Gr \approx Re^2. \quad (1)$$

Такой режим может возникнуть, например, при теплообмене в вязких жидкостях, в случае теплообмена между телом и газовым потоком при больших значениях ΔT , в промежуточных теплообменниках АЭС с жидкометаллическими теплоносителями при малых расходах теплоносителей.

Исследование теплообмена при одновременном влиянии свободной и вынужденной конвекции для тел различной формы (цилиндр, шар, треугольник и т.д.) были выполнены Кришером и Лоосом [1]. Кришер предложил ввести универсальный определяющий размер l' — длину обтекания тела. Например, для шара $l' = \frac{\pi d}{2}$, для пластины $l' = l$ и т.д.

Однако следует отметить, что в настоящее время нет обобщенных критериальных зависимостей для расчета коэффициента теплообмена при соизмеримом влиянии свободной и вынужденной конвекции, которые бы учитывали взаимодействие потоков жидкости, вызываемых свободной и вынужденной конвекцией. Попытка оценки взаимодействия свободного и вынужденного потоков была предпринята применительно к натриевым промежуточным теплообменникам АЭС. Как известно, у нагретой поверхности поток жидкости в условиях гравитационного поля всегда движется снизу вверх. Понятно, что вынужденное движение жидкости в зависимости от направления движения (снизу, сверху, поперек и т.д.) может оказывать значительное влияние на коэффициент теплообмена.

В связи с этим в настоящей работе была поставлена задача исследования теплообмена при поперечном омывании одиночного цилиндра для различных направлений вынужденного движения относительно свободного и получение критериальных зависимостей, позволяющих рассчитывать теплообмен в этих условиях.

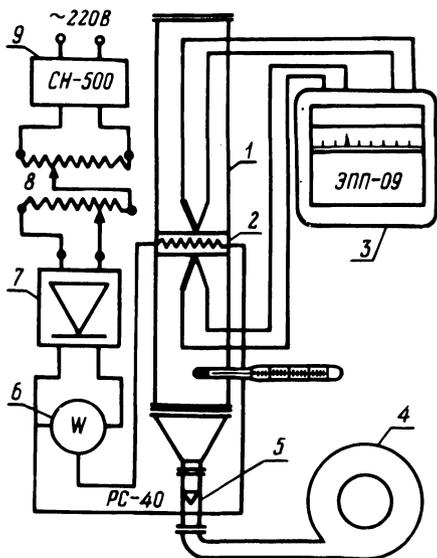


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Температура поверхности измерялась электронным потенциометром 3. Нагреватель калориметра питался постоянным током через стабилизатор 9, два автотрансформатора 8 и выпрямитель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, измерялась ваттметром 6, класса 0,1.

Эксперименты проводились с цилиндром диаметром $d = 0,012$ м в интервале изменения чисел Re от 20 до 350, чисел Gr от $3 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^4$ ($Gr^{0,5} = 54 \dots 200$) и температурных напоров ΔT от 10 до $140^\circ C$.

Так как в работе была поставлена задача получить уравнение для описания теплообмена при различных направлениях вынужденного движения относительно свободного, в критериальное уравнение для описания экспериментальных данных был введен множитель

$$a + b \cos \alpha. \quad (1)$$

Тогда уравнение в общем виде можно записать так:

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = C [Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}} (a + b \cos \alpha)^n]. \quad (2)$$

В уравнении (2) α — угол между направлением свободного и вынужденного движения. При совпадении направлений свободного и вынужденного движения $\alpha = 0$ и $\cos \alpha = 1$.

Экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1, выполнена в виде аэродинамической трубы 1 разомкнутого типа, соединенной гибким шлангом с вентилятором 4. Объемный расход воздуха измерялся газовым счетчиком 5 типа РС-40. Собственно аэродинамическая труба поворачивалась на 180° , при этом обеспечивалось различное направление потока вынужденного движения относительно свободного — от встречного до совпадающего. Экспериментальный цилиндр 2 был изготовлен из меди. В среднем сечении цилиндра зачеканены 4 хромель—копелевые термопары диаметром 0,2 мм. Температуру поверхности измерялась электронным потенциометром 3. Нагреватель калориметра питался постоянным током через стабилизатор 9, два автотрансформатора 8 и выпрямитель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, измерялась ваттметром 6, класса 0,1.

Величина коэффициентов a и b определялась из условия, что для всех трех случаев значение комплекса

$$Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}}(a + b \cos \alpha) \quad (3)$$

при одинаковых значениях числа $Nu_{\text{жд}}$ должны быть равны. На основании опытных данных (рис. 2) была записана система двух уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{aligned} Gr_{\text{жд}1}^{0,5} + Re_{\text{жд}1}(a + b \cos 0^\circ) &= Gr_{\text{жд}2}^{0,5} + Re_{\text{жд}2}(a + b \cos 90^\circ); \\ Gr_{\text{жд}2}^{0,5} + Re_{\text{жд}2}(a + b \cos 90^\circ) &= Gr_{\text{жд}3}^{0,2} + Re_{\text{жд}3}[a + b \cos 180^\circ], \end{aligned} \quad (4)$$

после решения которой были определены значения коэффициентов a и b . Численные значения коэффициентов равны: $a = 2,48$; $b = 0,545$.

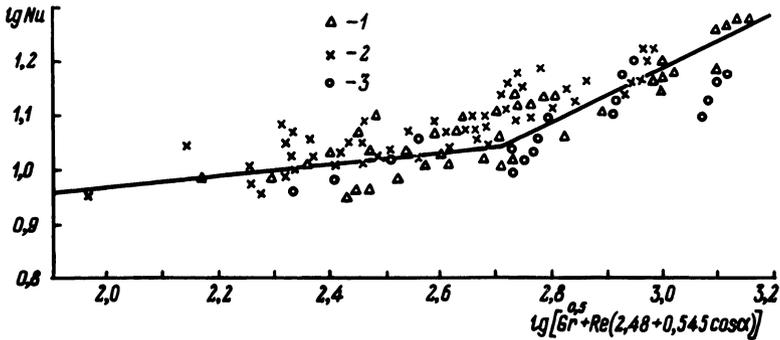


Рис. 2. Экспериментальные данные по теплообмену одиночного цилиндра:
1 – $\cos \alpha = 0$; 2, 3 – соответственно $\cos \alpha = 1$ и -1 .

Результаты обработки экспериментальных данных в виде уравнения (2) представлены на рис. 2. Из графика следует, что при значении

$$Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}}(a + b \cos \alpha) = 500 \quad (5)$$

характер теплообмена меняется.

Полученные для обеих областей уравнения имеют следующий вид:

для первой области ($100 < [Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}}(2,48 + 0,545 \cos \alpha)] < 500$);

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 6,0 [Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}}(2,48 + 0,545 \cos \alpha)]^{0,1} \quad (6)$$

и для второй области ($500 < [Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}}(2,48 + 0,545 \cos \alpha)] < 1400$);

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,5 [Gr_{\text{жд}}^{0,5} + Re_{\text{жд}}(2,48 + 0,545 \cos \alpha)]. \quad (7)$$

Анализ уравнения (6) показывает, что при изменении комплекса (5) от 100 до 500 число $\overline{Nu}_{\text{жд}}$ изменяется от 9,5 до 11,5, т.е. на $\pm 7,85$.

С другой стороны, погрешность экспериментальных данных в этой области составляет $\pm 15\%$. Поэтому в области значений комплекса от 100 до 500 можно с достаточной степенью точности считать, что

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 10,5. \quad (8)$$

Рассмотрим критериальное уравнение (7) для второй области. Так как эксперименты выполнялись на воздухе, в уравнение (7) по аналогии с известными уравнениями можно ввести число Pr для воздуха. После введения в уравнение (7) $Pr^{0,5}$ получим

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,6 (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25} + 0,6 Re_{\text{жд}}^{0,5} Pr_{\text{ж}}^{0,25} (2,48 + 0,545 \cos \alpha)^{0,5}. \quad (9)$$

Для случая $Re_{\text{жд}} \rightarrow 0$ уравнение (9) переходит в

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,6 (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25}, \quad (10)$$

что практически совпадает с известным уравнением (10) – (16) [2]

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,5 (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25}. \quad (11)$$

При $Gr_{\text{жд}} \rightarrow 0$ уравнение (9) запишется как

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,6 Re_{\text{жд}}^{0,5} Pr_{\text{ж}}^{0,25}, \quad (12)$$

т.е. достаточно хорошо согласуется с уравнением (9) – (1) [2].

Таким образом, критериальное уравнение (9) в крайних случаях $Gr_{\text{жд}} = 0$ или $Re_{\text{жд}} = 0$ переходит в известные соотношения. Для уточнения влияния числа $Pr_{\text{ж}}$ на теплообмен необходимо получение экспериментальных данных для жидкостей с различными числами Pr (вода, трансформаторное масло).

Л и т е р а т у р а

1. Кришнер О. Научные основы техники сушки. — М., 1978.
2. Исаиченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередачи. — М., 1975.