



Зависимость удельных расходов условного топлива от температуры наружного воздуха:
а – температура обратной сетевой воды 40 °С; **б** – температура обратной сетевой воды 40–50 °С; ● – базовый режим; ▲ – режим с двухступенчатым подогревом; ◆ – режим с трехступенчатым подогревом.

Проведенные предварительные расчеты позволили выявить следующие преимущества использования на ТЭЦ сетевой воды с пониженной температурой:

- сохраняется маневренность турбоустановки, поскольку для подогрева сетевой воды может быть использован только один из основных трубных пучков, а в другой трубный пучок и во встроенный в любой момент может быть подана охлаждающая вода;
- при сохранении отпуска теплоты реализация способа требует значительно меньших расходов сетевой воды, что позволит существенно снизить расходы электроэнергии на привод сетевых насосов;
- давление в конденсаторе на всех рассмотренных режимах не превышает 17 кПа, что позволяет эксплуатировать турбоустановку без удаления турбинных ступеней части низкого давления;
- могут быть существенно улучшены условия эксплуатации теплосети;
- переход на сетевую воду с пониженной температурой позволяет существенно повысить экономичность турбоустановки.

УДК 536.22

Валиюллина А. А., Евграфов В. А.
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет
valiyullinaa@yandex.ru

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

В условиях снижения затрат тепла в соответствии с законом энергетической эффективности возникает необходимость определения коэффициента

теплоотдачи в процессах кипения, которые осуществляются, в частности, в парогенераторах ТЭЦ. К настоящему времени выполнено значительное количество работ, посвященных процессам кипения жидкостей и переносу теплоты в кипящих жидкостях. Но проблема определения численных значений коэффициента теплоотдачи при кипении однофазных жидкостей до сих пор остается актуальной, так как точность определения коэффициента теплоотдачи влияет на точность расчета тепловых потоков.

При пузырьковом кипении жидкости основной поток тепла от нагреваемой поверхности передается жидкой фазе в связи с тем, что она имеет значительно большую теплопроводность, чем паровая фаза (при давлении $p = 1$ бар для воды коэффициент теплопроводности составляет $0,68 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, а для водяного пара – $0,02 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$). Таким образом, как в случае конвекции однофазной жидкости, при кипении основным является тепловое сопротивление пограничного слоя жидкости. Результаты экспериментов показывают, что процесс теплоотдачи между перегретой жидкостью и поверхностью пузырька отличается высокой интенсивностью. При этом коэффициенты теплоотдачи от воды к пару достигают величин порядка $200\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Только за счет такого интенсивного значения коэффициента теплоотдачи пузырек при всплывании жидкости значительно увеличивается в размерах [1].

При изучении процессов теплообмена использовалась экспериментальная установка. Целью эксперимента являлось определение погрешности коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости между полученными опытными данными (таблица) и приведенными в литературе.

Площадь боковой поверхности цилиндра определяется из соотношения

$$F = \pi \cdot D \cdot L = 3,14 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 6,374 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (1)$$

Образцовое сопротивление $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$.

Тепловой поток определяется по мощности, потребляемой нагреваемым цилиндром:

$$Q = U_{\text{н}} \cdot \frac{U_0}{R_0}, \quad (2)$$

где $U_{\text{н}}$ – напряжение на нагревателе цилиндра, В; U_0 – падение напряжения на образцовом сопротивлении, В.

Данные, полученные в ходе эксперимента

№ п/п	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_3, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_{\text{н}}, \text{ В}$	$U_0, \text{ В}$	$Q, \text{ }^\circ\text{C}$
1	102,1	99,1	99,0	194,3	3,182	6183
2	103,2	98,6	99,3	194,3	3,255	6324
3	106,9	98,6	99,4	195,2	3,395	6627
4	108,1	104,7	107,5	196,3	3,675	7214
5	114,2	105,9	108,5	197,2	3,866	7624
	$\bar{t}_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_3, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{U}_{\text{н}}, \text{ В}$	$\bar{U}_0, \text{ В}$	$\bar{Q}, \text{ Вт}$
	106,9	101,4	103,7	195,5	3,475	6794
$t_c = \frac{\bar{t}_1 + \bar{t}_3}{2} = \frac{106,9 + 103,7}{2} = 105,3$						

По данным таблицы, определим экспериментальный средний коэффициент теплоотдачи между поверхностью обогреваемого цилиндра и кипящей воды по соотношению

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{Q}{F \cdot (t_c - t_n)} = \frac{6794}{6,374 \cdot 10^{-3} \cdot 5,3} = 201122 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, передаваемый от поверхности цилиндра к воде, Вт; F – площадь поверхности цилиндра, м^2 ; t_c – средняя температура этой поверхности, $^{\circ}\text{C}$; t_n – температура насыщения при атмосферном давлении, $^{\circ}\text{C}$.

Температуру насыщения при атмосферном давлении определяем по теплофизическому справочнику: $t_n = 100^{\circ}\text{C}$.

При пузырьковом кипении воды в атмосферных условиях различают две области кипения. В первой области при малых температурных напорах ($\Delta t \leq 5^{\circ}\text{C}$) значения коэффициента теплоотдачи невелики и определяются условиями свободной конвекции однофазной жидкости. Во второй области при повышенных температурных напорах ($5^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 25^{\circ}\text{C}$) коэффициент теплоотдачи значительно возрастает. Это связано с интенсивной конвекцией жидкости вследствие роста и движения паровых пузырей. В условиях эксперимента установлено, что температурный напор составляет $\Delta t = 5,3^{\circ}\text{C}$. Для воды применяют зависимости, полученные из опытных данных:

$$\alpha = 38,7 \cdot \Delta t^{2,33} p^{0,5}, \quad (4)$$

где p – атмосферное давление, бар.

Так как опыт проводится при атмосферном давлении, принимаем $p = 1$ бар.

Тогда

$$\alpha_{\text{теор}} = 38,7 \cdot 5,3^{2,33} \cdot 1^{0,5} = 1885 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Имеется значительное несоответствие между опытными данными и теоретическими значениями. Чтобы установить истину, обратились к научной литературе.

При изучении литературы было установлено, что теплоотдача между перегретой жидкостью и поверхностью пузырька отличается большой интенсивностью. Именно за счет этого пузырек при всплывании в жидкости значительно увеличивается в размерах.

Таким образом, значение коэффициента теплоотдачи соответствует литературным данным [2].

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{q}{(t_c - t_n)}, \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока, равная отношению количества теплоты к площади боковой поверхности медного цилиндра, помещенного в жидкость. Приведенное уравнение (5) совпадает с расчетным уравнением (3), согласно которому был рассчитан коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, приведенная в методических указаниях расчетная формула (4) не может быть применена для данного опыта. Первоначально поставленная цель работы не выполнена. Это связано с неточностью приведенного в паспорте уравнения. Но полученные экспериментально величины коэффициента

теплоотдачи являются достоверными и соответствуют приведенным данным в литературе.

Проведем оценку погрешности определения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении, полученного экспериментальным путем (3).

В связи с тем, что все измеряемые параметры определяются с допустимыми отклонениями, которые можно считать предельными значениями погрешности, то и сам коэффициент теплоотдачи может быть оценен с каким-то пределом допускаемой погрешности. Коэффициент теплоотдачи определяется как результат косвенных измерений параметров Q , F , t_c , t_n , поэтому предел допускаемой абсолютной погрешности определения коэффициента теплоотдачи может быть подсчитан по формуле (6):

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right) \cdot \Delta Q\right)^2 + \left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial t_c}\right) \cdot \Delta t_c\right)^2}. \quad (6)$$

Расчетный коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{Q}{F \cdot (t_c - t_n)} = \frac{6794}{6,374 \cdot 10^{-3} \cdot 5,3} = 201122 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Предел допускаемой относительной погрешности:

$$\delta_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{\text{экспер}}} \cdot 100 = \pm \frac{1909}{201122} \cdot 100 = \pm 1 \text{ \%}.$$

Из результатов расчета абсолютной погрешности измерения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении следует, что наибольшая составляющая величины погрешности связана с погрешностью измерения напряжения. При детальном изучении погрешности измерения напряжения было установлено, что наибольшая величина случайной погрешности связана с измерением падения напряжения на образцовом сопротивлении.

Список литературы

1. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Теплообмен : учебник для вузов. М. : Издательский дом МЭИ, 2011. 562 с., ил.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. М.–Л. : Энергия, 1982. 422 с., ил.
3. Исследование теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости: паспорт лабораторного комплекса. 4 с.

УДК 697.34

Ветлов Е. С.
Уральский федеральный университет,
Vetlov66@rambler.ru

ОЦЕНКА МАСШТАБОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОБОГРЕВ СПУТНИКОВ ХВС

Передача тепла в системах централизованного теплоснабжения всегда сопровождается потерями энергии в окружающую среду. Определение величины