

Бальчугов Алексей Валерьевич,
д.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: balchug@mail.ru

Важенин Михаил Николаевич,
магистрант, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: nir@angtu.ru

Кустов Борислав Олегович,
аспирант, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: orgnir@angtu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ ТРУБЕ

Balchugov A.V., Vajenin M.N., Kustov B.O.

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN A HORIZONTAL HEAT EXCHANGE PIPE

Аннотация. Экспериментально установлено, что модель идеального вытеснения адекватно описывает процесс теплопередачи в горизонтальной теплообменной трубе, охлаждаемой атмосферным воздухом.

Ключевые слова: интенсификация теплопередачи, теплообменная труба, лабораторная установка, математическая модель идеального вытеснения.

Abstract. It has been experimentally established that the ideal displacement model adequately describes the heat transfer process in a horizontal heat exchange pipe cooled by atmospheric air.

Key words: heat transfer intensification, heat exchange pipe, laboratory setup, mathematical model of ideal displacement.

Течение жидкости по трубе имеет сложный характер: в турбулентном потоке возникают беспорядочные вихри; у стенок трубы скорость жидкости меньше, чем в центре потока; возможно возникновение обратных потоков жидкости, направленных противоположно основному потоку. Из-за этого точно математически описать реальный поток очень сложно [1]. Поэтому исследователи реальную картину процесса часто заменяют упрощенной картиной, в которой пренебрегают явлениями, усложняющими описание процесса, но существенно не влияющими на результаты расчета. Такие теоретические картины называются моделями. Они лишь приближенно описывают реальные процессы, но во многих простых случаях оказываются продуктивными.

Цель настоящей работы – определить, является ли адекватной математическая модель идеального вытеснения при описании процесса теплопередачи в горизонтальной трубе, охлаждаемой атмосферным воздухом при свободной конвекции. В этой связи проведены эксперименты на лабораторной установке, определен перепад температуры воды в теплообменной трубе, и выполнен расчет этого перепада по температуре в соответствии с моделью идеального вытеснения. Сравнение расчетного и экспериментального перепада температуры покажет, насколько адекватна математическая модель идеального вытеснения в данном случае.

Создана лабораторная установка для исследования различных методов интенсификации теплопередачи на горизонтальной теплообменной трубе. Схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Установка состоит из горизонтальной теплообменной трубы (1), емкости (2) с водой объемом 40 литров, приемной емкости (3), вентиля (4), электронагревателя (5), опор (6), соединительных шлангов, ротаметра (7), термометров (8-10). Разность уровней воды в емкостях (2) и (3) составляет 1,8 м. Уровень горизонтальной трубы над уровнем

пола – 1 м. Внутри теплообменной трубы самотеком течет поток горячей воды из емкости (2) в емкость (3). Теплообменная труба охлаждается снаружи атмосферным воздухом при свободной конвекции.

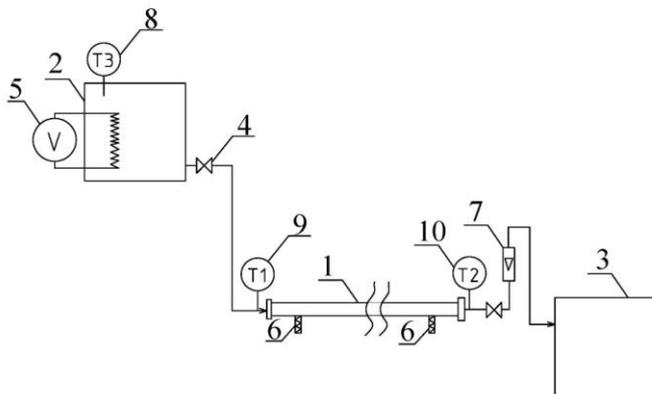


Рисунок 1 – Лабораторная установка

Эксперимент по определению коэффициента теплопередачи на горизонтальной трубе, охлаждаемой атмосферным воздухом при свободной конвекции, выполнен при следующих условиях: режим установившийся, расход воды 26,3 кг/ч; начальная температура воды в трубе $t_1=92,2$ °С; длина трубы $l=1,5$ м; наружный диаметр трубы $d_n=0,035$ м; внутренний диаметр трубы $d_s=0,033$ м; температура атмосферного воз-

духа $t_s=26$ °С.

Тепловой поток Q (тепловая нагрузка) определялся из теплового баланса по уравнению:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2) = 7,5315 \cdot 10^{-6} \cdot 970 \cdot 4190 \cdot (92,2 - 90,4) = 55,1 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, кг/м^3 ; c – теплоемкость воды, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{град)}$; V – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; t_1 и t_2 – соответственно, начальная и конечная температура воды, град.

Средняя температура жидкости:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{92,2 + 90,4}{2} = 91,3 \text{ °С}. \quad (2)$$

Площадь теплопередачи:

$$F = \pi \cdot d_n \cdot l = 3,14 \cdot 0,035 \cdot 1,5 = 0,16 \text{ м}^2, \quad (3)$$

Средняя движущая сила процесса:

$$\Delta t_{cp} = t_{cp} - t_s = 91,3 - 26 = 65,3 \text{ °С}. \quad (4)$$

Экспериментальный средний коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$) по длине трубы определяется по уравнению:

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{55,1}{0,16 \cdot 65,3} = 5,27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \quad (5)$$

Экспериментально определенная конечная температура воды в трубе составила $t_2=90,4$ °С. Экспериментальный перепад температуры в теплообменной трубе составил 1,8 °С.

Выполним расчет перепада температуры в теплообменной трубе с помощью модели идеального вытеснения. В основе данной модели лежат следующие допущения: жидкость движется по трубе как поршень, т.е. температура и скорость жидкости постоянна в поперечном сечении трубы, температура жидкости изменяется только вдоль трубы, отсутствует перемешивание жидкости вдоль трубы.

Исходными данными для расчета в соответствии с моделью идеального вытеснения являются: начальная температура воды t_1 , °С; температура атмо-

сферного воздуха $t_г, °C$; длина трубы $l, м$; диаметр трубы $d, м$; объемный расход воды $V_L, м^3/с$; плотность воды $\rho, кг/м^3$; теплоемкость воды $c_p, Дж/(кг·град)$; коэффициент теплопередачи $K, Вт/(м^2·град)$.

Выделим мысленно в трубе бесконечно малый участок длиной dx . Поверхность теплопередачи данного участка трубы равна произведению длины окружности на длину участка: $dF = 2\pi r \cdot dx$. Площадь поперечного сечения трубы составит $S = \pi r^2$.

Количество теплоты, переданное от горячей воды к атмосферному воздуху на бесконечно малом участке трубы в соответствии с основным уравнением теплопередачи, составит:

$$dQ = K \cdot dF \cdot (t_{жс} - t_г) \cdot d\tau = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dx \cdot (t_{жс} - t_г) \frac{dx}{w}, \quad (6)$$

где w – скорость жидкости в трубе, м/с; r – внутренний радиус трубы, м; τ – время, с; F – площадь теплопередачи, м².

Это же количество теплоты можно определить по уравнению:

$$dQ = dV \cdot c_p \cdot dt_{жс} = S \cdot dx \cdot \rho \cdot c_p \cdot dt_{жс}, \quad (7)$$

где dV – объем элементарного участка трубы, м³; $dt_{жс}$ – перепад температуры воды в элементарном участке трубы, °C.

Приравняв правые части этих уравнений, получим:

$$K \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dx \cdot (t_{жс} - t_г) \frac{dx}{w} = S \cdot dx \cdot \rho \cdot c_p \cdot dt_{жс}, \quad (8)$$

После простых преобразований дифференциальное уравнение принимает вид:

$$\frac{dt_{жс}}{dx} = \frac{2 \cdot K \cdot (t_{жс} - t_г)}{w \cdot r \cdot \rho \cdot c_p}. \quad (9)$$

Решим это уравнение. Перевернем правую и левую части уравнения:

$$\frac{dx}{dt_{жс}} = \frac{w \cdot r \cdot \rho \cdot c_p}{2 \cdot K \cdot (t_{жс} - t_г)}. \quad (10)$$

Обозначим:
$$A = \frac{w \cdot r \cdot \rho \cdot c_p}{2 \cdot K}. \quad (11)$$

Тогда
$$dx = \frac{A}{(t_{жс} - t_г)} dt_{жс}. \quad (12)$$

Интегрируем. Все величины, вынесенные за знак интеграла, постоянны (не зависят от длины трубы):

$$x = A \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt_{жс}}{(t_{жс} - t_г)}. \quad (13)$$

Интеграл в правой части уравнения имеет решение в виде натурального логарифма:

$$x = A [\ln(t_1 - t_г) - \ln(t_2 - t_г)]. \quad (14)$$

Отсюда:
$$t_2 = t_г + (t_1 - t_г) \cdot e^{-\frac{x}{A}}, \quad (15)$$

где x – расстояние от заданного сечения трубы до входа в трубу, м; t_2 – температура воды в данном сечении трубы, °C.

Уравнение (15) позволяет определить температуру горячей воды в любом сечении трубы, в том числе и в выходном сечении, в соответствии с моде-

лью идеального вытеснения. По уравнению (15) выполнен расчет конечной температуры воды в трубе для условий эксперимента: начальная температура воды $t_1=92,2$ °С; температура атмосферного воздуха $t_a=26$ °С; длина трубы $l=1,5$ м; диаметр трубы $d_e=0,033$ м; объемный расход воды $V_L=7,5315 \cdot 10^{-6}$ м³/с; плотность воды $\rho=970$ кг/м³; теплоемкость воды $c_p=4190$ Дж/(кг·град); расчетный коэффициент теплопередачи $K=5,27$ Вт/(м²·град).

Результаты расчета изменения температуры горячей воды по длине трубы, охлаждаемой атмосферным воздухом при свободной конвекции воздуха, в соответствии с моделью идеального вытеснения приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при данных условиях в соответствии с моделью идеального вытеснения распределение температуры по длине трубы имеет линейный характер.

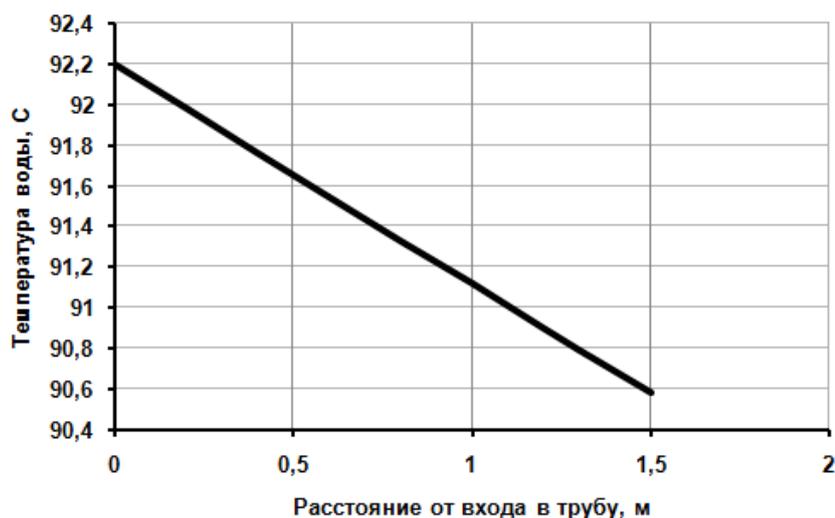


Рисунок 2 – Распределение температуры воды по длине трубы в соответствии с моделью идеального вытеснения

В соответствии с моделью идеального вытеснения температура воды на выходе из трубы должна составить $t_2=90,58$ °С, а перепад температуры по длине трубы должен составить 1,62 °С. Температура же воды на выходе из трубы, определенная экспериментально, составила 90,4 °С, а экспериментальный перепад температуры составил: 1,8 °С. Определим отклонение рассчитанного по модели идеального вытеснения перепада температуры по длине отрубы от экспериментально определенного:

$$\Delta\% = \frac{1,8 - 1,62}{1,8} \cdot 100\% = 10,0\% . \quad (16)$$

Отклонение составляет 10,0 %. Таким образом, модель идеального вытеснения адекватно описывает процесс теплопередачи в горизонтальной трубе, охлаждаемой атмосферным воздухом. Данную математическую модель можно использовать при исследовании аппаратов воздушного охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаренков А.В., Комов А.Т., Варава А.Н., Дедов А.В., Болтенко Э.А., Мясников В.В., Ильин А.В. Экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических характеристик модельных элементов тепловыделяющих сборок // Вестник МЭИ. – №2. – 2013. – С. 39-45.