

УДК 536.24:532.55

А. А. ХАЛАТОВ, д-р техн. наук; академик НАНУ; зав. отделом ИТТФ НАНУ, зав. каф. «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ», Киев;
А. Ж. МЕЙРИС, аспирант НТУУ «КПИ»; м.н.с. ИТТФ НАНУ, Киев;
Т. В. ДОНИК, канд. техн. наук; н.с. ИТТФ НАНУ, ассистент каф. «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ», Киев;
А. В. ГАМРЕЦКАЯ, студентка НТУУ «КПИ», Киев

ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ВОЗДУХОМ ПЕРВОГО РЯДА ПУЧКА ТРУБ СО СФЕРИЧЕСКИМИ УГЛУБЛЕНИЯМИ

Создана экспериментальная установка и проведены тестовые исследования. Проведены экспериментальные исследования среднего теплообмена и гидродинамического сопротивления при обтекании пучков труб со сферическими углублениями на поверхности. На первом этапе изучен средний теплообмен и гидродинамическое сопротивление для первого ряда шахматного пучка. Получены коэффициенты теплоотдачи и коэффициенты гидродинамического сопротивления (число Эйлера) для первого ряда пучка круглых труб с углублениями при поперечном обтекании.

Ключевые слова: теплообмен, гидродинамическое сопротивление, пучки труб, сферические углубления.

Введение

В настоящее время интенсификация теплообмена при обтекании круглых труб продолжает привлекать внимание исследователей и инженеров в связи с разработкой новых энергетических установок и эффективных методов утилизации тепловой энергии. В последнее время для внешней интенсификации теплообмена широко используются различные методы профилирования труб (овальные, эллиптические, каплеобразные, плоскоовальные трубы и другие) и нанесения искусственной шероховатости (ребра, выступы, песочная шероховатость и т.д.) [1].

Особый интерес представляет интенсификация теплообмена за счет использования различных видов шероховатости, а именно применение сферических углублений на поверхности труб. Данный вид шероховатости характеризуется ростом теплообмена при незначительном увеличении гидродинамического сопротивления, при этом обеспечивается компактность и эффективность теплообменного оборудования [2]. Применение углублений на наружной стороне пучков труб регенераторов и соответствующих выступов на внутренней их поверхности интенсифицирует теплоотдачу с обеих сторон.

Цель данной работы – экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамического сопротивления при обтекании пучка труб с углублениями на внешней поверхности.

Экспериментальная установка

Для исследования теплообмена и гидродинамического сопротивления при поперечном обтекании воздухом пучка труб была создана экспериментальная установка (рис. 1), которая представляла собой открытый газодинамический контур.

Воздух, всасываемый компрессором низкого давления 1, проходил через расходомер, в виде чашечного анемометра 5, затем через хонейкомб 4 поступал в рабочий участок 2, с установленными в нем исследуемыми трубами с углублениями. Регулирующий вентиль 3, позволял изменять расход, соединяя всасывающую магистраль с атмосферой. Установка снабжалась системой измерений.

© А.А. Халатов, А.Ж. Мейрис, Т.В. Доник, А.В. Гамрецкая, 2015

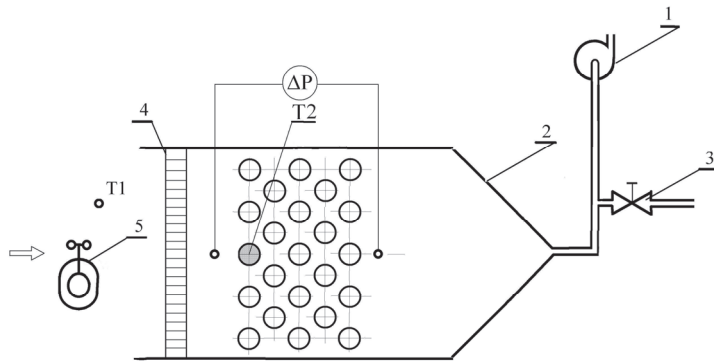


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:
 1 – компрессор низкого давления; 2 – рабочий участок;
 3 – регулирующий вентиль; 4 – хонейкомб; 5 – анемометр

Рабочий участок представлял собой прямоугольный канал, поперек которого устанавливались пять рядов труб по пять труб в каждом (в нечетных рядах) с шахматным размещением в пучке.

В экспериментах исследовались пучки гладких труб и труб со сферическими углублениями, на поверхности которых сформированы штамповкой

сферические углубления относительной глубиной $h/d = 0,3$, расположенные в шахматном порядке. Наружный диаметр труб составлял $D = 22$ мм, относительный поперечный шаг – $s_1/D = 1,7$, относительный продольный шаг – $s_2/D = 1,2$. Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса от 5000 до 16000, что соответствует переходному режиму течения для гладких труб.

Для определения количества теплоты, передававшейся от нагретого воздуха к среднему цилиндру в ряду, использовался метод калориметра с таящим льдом [3]. Данный метод для определения теплообмена в пучках труб показывает значительно меньшую погрешность, по сравнению с методом, который основан на измерении температурного перепада на стенке [3]. Перед экспериментом обтекаемая воздухом труба с углублениями заполнялась дистиллированной водой и помещалась в морозильную камеру для образования в ней льда. В начале эксперимента цилиндр-калориметр устанавливался в рабочем участке и подвергался обдуву воздухом. Средний тепловой поток определялся по результатам измерения объема воды, образовавшейся за фиксированный отрезок времени.

Методика обработки результатов

Количество теплоты, которое подводится к боковой поверхности цилиндра-калориметра F для образования объема воды V определялось из следующего выражения

$$Q = rV\rho + c_{\text{л}}(t_f - t_{\text{лн}})V\rho_{\text{л}} + c_{\text{м}}(t_f - t_{\text{лн}})F\delta\rho_{\text{м}}, \quad (1)$$

где r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; ρ , $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{м}}$ – плотность воды, льда и металла, соответственно, кг/м³; $c_{\text{л}}$ и $c_{\text{м}}$ – удельная теплоемкость льда и металла, Дж/(кг·К); t_f и $t_{\text{лн}}$ – температура фазового перехода и начальная температура льда, К; δ – толщина стенки калориметра, м. В представленном выражении первые два члена правой части уравнения определяют количество теплоты, подведенной ко льду в калориметре, а третий – количество теплоты, подведенное к стенке калориметра.

Средний тепловой поток через стенку калориметра определялся по уравнению

$$\frac{Q}{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}} + \frac{S}{2\lambda} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{м}}}} F(t_i - t_f), \quad (2)$$

где τ – время проведения опыта, час, $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи от поверхности калориметра, Вт/(м²·К), S – толщина слоя воды, образовавшейся во время

опыта, m ; λ и λ_m – коэффициент теплопроводности воды и металла, соответственно, Вт/(м·К), t_i – температура набегающего воздуха, К.

Средний коэффициент теплопередачи от воздуха ко льду в калориметре определялся из следующего выражения, полученного из выражения (2)

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{F(t_i - t_f)\tau}{Q} - \frac{S}{2\lambda} - \frac{\delta}{\lambda_m}}. \quad (3)$$

Среднее число Нуссельта и число Эйлера, определяемое по перепаду давления на пучке труб, соответственно:

$$\bar{Nu} = \bar{\alpha}d/\lambda_b, \quad Eu = \Delta P/\rho w^2. \quad (4)$$

Тестовые эксперименты

На первом этапе проводились тестовые эксперименты по теплообмену для пучков гладких труб с относительным поперечным шагом $s_1/D = 1,7$, основной целью которых было сравнение измеренных данных с известными зависимостями. На рис. 2 представлена зависимость среднего теплообмена и гидродинамического сопротивления для первого ряда пучка гладких труб.

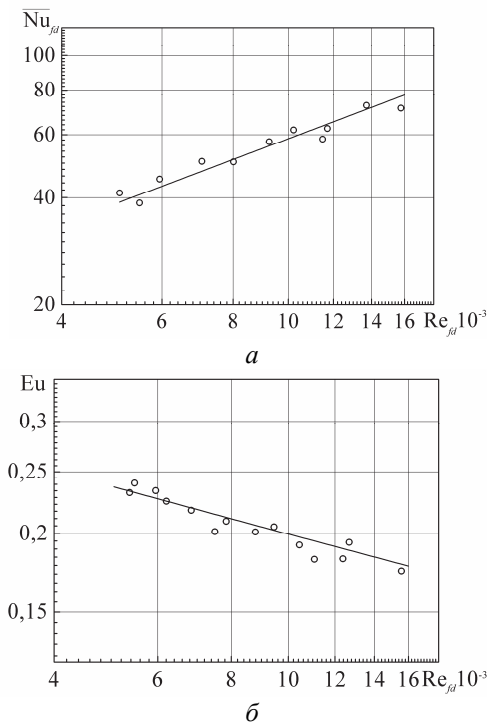


Рис. 2 – Зависимости для первого ряда пучка труб: a – средний теплообмен; b – гидродинамическое сопротивление; точки – результаты экспериментов; линия – по уравнению (5) и (6), соответственно

гидродинамического сопротивления выполнялись для первого ряда пучка труб со сферическими углублениями (рис. 3). Число Нуссельта (коэффициент теплоотдачи) определялся по площади «гладкого» цилиндра. Как следует из рисунка, в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса наличие сферических углублений на поверхностях трубок приводит к увеличению теплоотдачи на 35 %, по сравнению с

Для сравнения с полученными экспериментальными данными использовалось уравнение подобия для среднего теплообмена первого ряда пучка гладких труб при переходном режиме течения [4]

$$\bar{Nu}_{fd} = 0,246 Re_{fd}^{0,6} Pr_f^{0,33} (s_1/s_2)^{0,17} \quad (5)$$

и уравнение для гидродинамического сопротивления гладких труб [5]:

$$Eu = 2,316 \sqrt{\frac{1-d/s_3}{s_1/d-1}} Re_{fd}^{-0,25}. \quad (6)$$

Как следует из рис. 2, в диапазоне изменения числа Рейнольдса от 5000 до 16000 отклонение экспериментальных значений по среднему числу Нуссельта и числу Эйлера от уравнений (5) и (6) не превышает $\pm 8\%$.

Таким образом, установка и система измерений по точности измерений соответствуют основным требованиям к теплофизическим экспериментам, а экспериментальный участок удовлетворяет условиям гидравлической гладкости.

Результаты исследований

Первая серия экспериментальных исследований среднего теплообмена и

данными для гладких труб (рис. 3а). Гидродинамическое сопротивление пучка круглых труб (рис. 3б) с углублениями на внешней поверхности увеличивается только на 10 %.

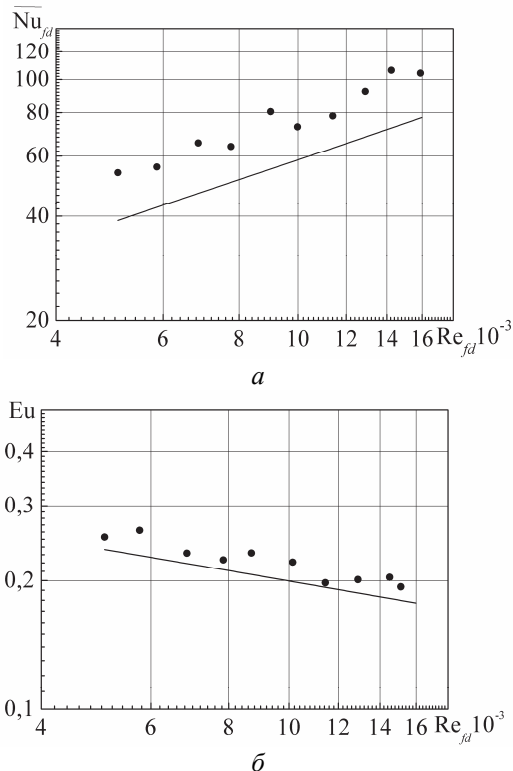


Рис. 3 – Зависимости для первого ряда пучка труб с углублениями на внешней поверхности: а – средний теплообмен; б – гидродинамическое сопротивление; точки – результаты экспериментов, линия – по уравнению (5) и (6), соответственно

В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса экспериментальные данные, характеризующие число Нуссельта и число Эйлера, для труб со сферическими углублениями располагаются практически параллельно линиям, которые соответствуют уравнениям (5) и (6). Это обуславливает одинаковое значение фактора интенсификации теплообмена и относительных гидравлических потерь для исследованного диапазона чисел Рейнольдса.

В дальнейших исследованиях будет изучен средний теплообмен и гидродинамическое сопротивление для третьего и пятого рядов пучка труб с поверхностными углублениями, а также выполнен анализ теплогидравлической эффективности данного типа интенсификации теплообмена.

Выводы

Создана экспериментальная установка для исследования теплообмена и гидродинамического сопротивления пучков труб с углублениями сферического типа на внешней поверхности. Получены коэффициенты теплоотдачи и коэффициенты гидродинамического сопротивления (число Эйлера) для первого ряда пучка круглых труб

с углублениями при поперечном обтекании. Показано, что при использовании сферических углублений на поверхности круглых труб интенсификация теплообмена составляет на 35 % при росте гидродинамического сопротивления только на 10 %.

Список литературы: 1. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М. : Машиностроение, 1972. – 220 с. 2. Коваленко, Г. В. Сравнение различных способов интенсификации теплообмена на цилиндрических поверхностях [Текст] / Г. В. Коваленко, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 3. – С. 58–60. – ISSN 0204-3602. 3. Коваленко, Г. В. Применение ледяных калориметров для исследования теплоотдачи поверхностей, формированных углублениями [Текст] / Г. В. Коваленко, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2008. – № 2. – С. 5–12. 4. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kalinin E. K., G. A. Dreytser, S. A. Yarho. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalah*. Moscow : Mashinostroenie, 1972. Print. 2. Kovalenko, G. V., A. Zh. Meyris. "Sravnenie razlichnykh sposobov intensifikatsii teploobmena na tsilindricheskikh poverhnostyakh." *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal pere-dovyih tehnologiy* 3 (2013): 58–60. Print. ISSN 0204-3602. 3. Kovalenko G. V., A. A. Khalatov. "Primenenie ledyanykh kalorimetrov dlya issledovaniya teplootdachi poverhnostey, formirovannykh uglubleniyami." *Promyishlennaya teplotekhnika* 2 (2008): 5–12. Print. 4. Isachenko V. P., Osipova V. A., A. S. Sukomel. *Teploperedacha*. Moscow : Energoizdat, 1981. Print.

Поступила (received) 14.02.2015