

02, февраль 2016

УДК 536.252

Разработка экспериментального стенда для исследования характеристик теплообменного аппарата типа «труба в трубе»

Воронов В.А., аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»*

Хуциева С.И., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»*

Паркин А.Н., преподаватель

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»*

*Научный руководитель: Паркин А.Н., преподаватель кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
crio@power.bmstu.ru*

Теплообменный аппарат (ТОА) — устройство, в котором осуществляется процесс обмена энергией в форме тепла между потоками. Тепловая энергия является основной формой энергии в технике, что обуславливает широчайшее распространение ТОА во всех отраслях промышленности, включая нефтегазовую, химическую, атомную, холодильную, пищевую и другие отрасли.

Задачей данной работы является разработка экспериментального стенда для исследования конвективного теплообмена в модельном ТОА типа «труба в трубе» (рис. 1). Экспериментальный стенд представляет собой модельный ТОА, с установленной на нем измерительной частью, позволяющей определять режим работы модельного ТОА по набору непосредственно измеряемых показателей потоков. ТОА представляет собой две соосно расположенные гладкие медные трубы диаметром 29 и 12 мм, в которые противотоком подается техническая вода (рис. 2), параметры которой измеряются

приборной частью стенда. Приборная часть стенда включает в себя термометры, устройства измерения среднего расхода.



Рис. 1. Фотография экспериментального стенда

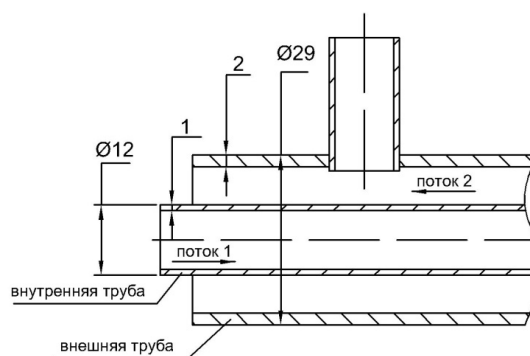


Рис. 2. Теплообменный аппарат

Проектный расчет модельного ТОА производится на следующие параметры рабочих сред, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры рабочих сред

Наименование величины	Условное обозначение	размерность	значение
Давление воды	P	МПа	0,6
Массовый расход по внутренней трубе	G_1	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	0,167
Температура на входе во внутреннюю трубу	$T_{1н}$	°С	70
Температура на выходе из внутренней трубы	$T_{1к}$	°С	60,572

Массовый расход по внешней трубе	G_2	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	0,5
Температура на входе во внешнюю трубу	$T_{2н}$	$^{\circ}\text{C}$	5
Диаметр внутренний внешней трубы	D	мм	25
Толщина внешней трубы	s_1	мм	2
Диаметр внутренний внутренней трубы	d	мм	10
Толщина внутренней трубы	s_2	мм	1

$T_{1к}$ определена в результате итерационного поиска решения системы уравнений, описывающих процесс теплообмена в рассматриваемом ТОА.

Расчетные величины термодинамических свойств приведены в таблице 2.

Таблица 2

Термодинамические свойства

труба	$P_{\text{среднее}}, \text{МПа}$	$T_{\text{среднее}}, ^{\circ}\text{C}$	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\mu, * 10^{-7} \text{Па} \cdot \text{с}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
внутренняя	0,6	65,286	4184,2	4316,1	655,9	980,6
внешняя	0,6	6,565	4199,5	14453	575,7	1000,2

Где c_p - изобарная теплоемкость,

μ - динамическая вязкость,

λ - теплопроводность,

ρ —плотность.

Принятые в расчете допущения:

- свойства технической воды приняты при средней температуре, не зависящими от температуры;

- потери тепла с в модельном ТОА пренебрежимо малы;

Из теплового баланса по потоку 1 находим тепловую нагрузку

$$Q = G_1 * c_{1p} * (T_{1н} - T_{1к}) = 0,167 * 4184,2 * (70 - 60,572) = 6575 \text{ Вт}$$

Из теплового баланса по потоку 2 находим температуру на выходе из внешней трубы

$$T_{2к} = \frac{Q}{G_2 * c_{2p}} + T_{2н} = \frac{6575}{0,5 * 4199,5} + 5 = 8,13 ^{\circ}\text{C}$$

Определяем среднюю логарифмическую разность температур θ .

Для этого находим разности температур потоков на концах ТОА

$$\Delta t_1 = T_{1н} - T_{2к} = 70 - 8,13 = 61,87 ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_2 = T_{1K} - T_{2H} = 60 - 5 = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{61,87 - 55}{\ln\left(\frac{61,87}{55}\right)} = 58,664 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Определяем коэффициент теплоотдачи при КТО для потока 2:

Площадь фронтального сечения

$$S_2 = \frac{\pi}{4} * (D^2 - (d + 2 * s_2)^2) = \frac{3,14}{4} * (25^2 - 12^2) * 10^{-6} = 3,78 * 10^{-4} \text{ м}^2$$

Скорость потока во внешней трубе

$$W_2 = \frac{G_2}{S_2} = \frac{0,5}{3,78 * 10^{-4}} = 1323,53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Эквивалентный диаметр

$$d_{\text{экв}2} = D - (d + 2 * s_2) = 13 \text{ мм}$$

Число Рейнольдса

$$Re_2 = W_2 * \frac{(d + 2 * s_2)}{\mu_2} = 1323,53 * \frac{13 * 10^{-3}}{14453 * 10^{-7}} = 1,19 * 10^4$$

Число Прандтля

$$Pr_2 = \frac{c_{2p} * \mu_2}{\lambda_2} = \frac{4199,5 * 14453 * 10^{-7}}{575,7 * 10^{-3}} = 10,54$$

Число Нуссельта

$$Nu_2 = 0,023 * Re_2^{0,8} * Pr_2^{0,33} = 0,023 * (1,19 * 10^4)^{0,8} * 10,54^{0,33} = 91,18$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_2 = Nu_2 * \frac{\lambda_2}{d_{\text{экв}2}} = 91,18 * \frac{575,7 * 10^{-3}}{13 * 10^{-3}} = 4037,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$$

Определяем коэффициент теплоотдачи при КТО для потока 1:

Площадь проходного сечения для потока 1

$$S_1 = 0,785 * d^2 = 0,785 * 10^2 * 10^{-6} = 7,85 * 10^{-5} \text{ м}^2$$

Скорость потока во внутренней трубе

$$W_1 = \frac{G_1}{S_1} = \frac{0,167}{7,85 * 10^{-5}} = 2123 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Эквивалентный диаметр

$$d_{\text{экв}1} = d = 10 \text{ мм}$$

Число Рейнольдса

$$Re_1 = W_1 * \frac{d_{\text{ЭКВ}}}{\mu_1} = 2123 * \frac{10 * 10^{-3}}{4316,1 * 10^{-7}} = 4,92 * 10^4$$

Число Прандтля

$$Pr_1 = \frac{c_{1p} * \mu_1}{\lambda_1} = \frac{4184,2 * 4316,1 * 10^{-7}}{655,9 * 10^{-3}} = 2,75$$

Число Нуссельта

$$Nu_1 = 0,023 * Re_1^{0.8} * Pr_1^{0.33} = 0,023 * (4,92 * 10^4)^{0.8} * 2,75^{0.33} = 182,14$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_1 = Nu_1 * \frac{\lambda_1}{d_{\text{ЭКВ}}} = 182,14 * \frac{655,9 * 10^{-3}}{10 * 10^{-3}} = 11946,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$$

Коэффициент теплопередачи для рассматриваемого ТОА

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s_2}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{11920} + \frac{1}{4044} + \frac{0,001}{401}} = 2995,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$$

$\lambda = 401 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$ – коэффициент теплопроводности меди,

Определяется площадь теплообменной поверхности

$$F = \frac{Q}{K * \theta} = \frac{6575}{2995,2 * 58,664} = 0,037 \text{ м}^2$$

И длина активной части ТОА

$$H = \frac{F}{\pi * (d + 2 * s_2)} = \frac{0,037}{3,14 * 12 * 10^{-3}} \approx 1 \text{ м}$$

Потери во внутренней и внешней трубе соответственно составляют

$$\Delta p = \frac{0,3164}{Re^{0.25}} * \frac{W^2 * H}{2 * \rho * d} \quad \Delta p_1 = 4,8 \text{ кПа}, \quad \Delta p_2 = 2,2 \text{ кПа}$$

Далее для фиксированной геометрии ТОА проводим серию проверочных расчетов, где при изменении $T_{2к}$ находим $T_{1н}$.

График изменения конечной температуры потока 2 $T_{2к}$ от начальной температуры потока 1 $T_{1н}$ для различных соотношений расходов приведен на рис. 3.

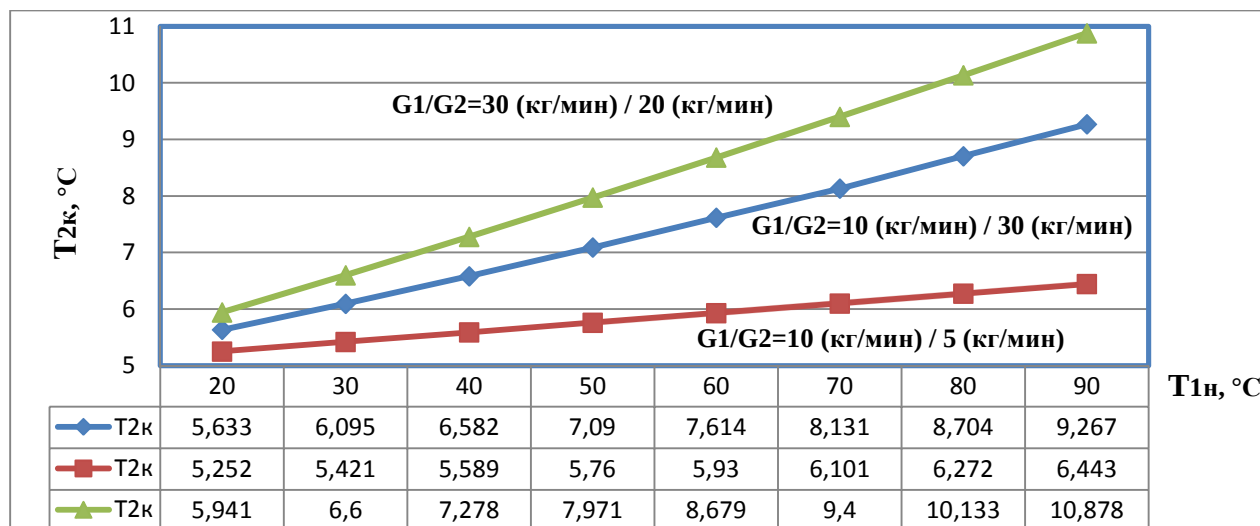


Рис. 3. Влияние $T_{1н}$ на $T_{2к}$

Из графика видно, что в данном диапазоне, $T_{2к}$ линейно увеличивается с ростом $T_{1н}$. При соотношении расходов $G1/G2=10$ (кг/мин) / 5 (кг/мин) во внешней трубе режим течения - ламинарный. В этом случае, коэффициент теплоотдачи α_2 имеет маленькое значение (рис. 4), это объясняет незначительное изменение $T_{2к}$ (рис. 3).

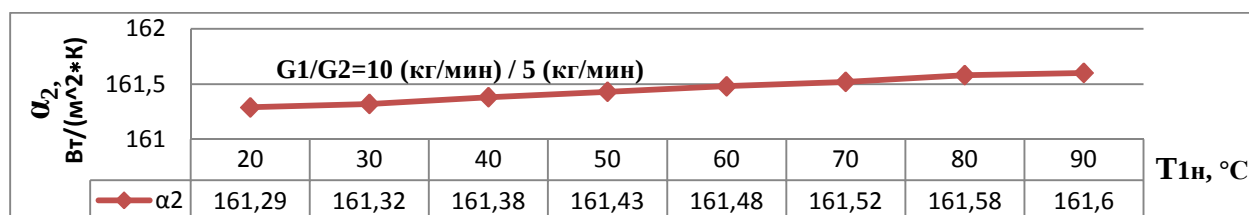


Рис. 4. График изменения α_2 от $T_{1н}$

Графики изменения коэффициента теплоотдачи во внешней α_2 и внутренней α_1 трубе от начальной температуры потока 1 $T_{1н}$ приведены на рис. 4, рис. 5 и рис. 6 соответственно.

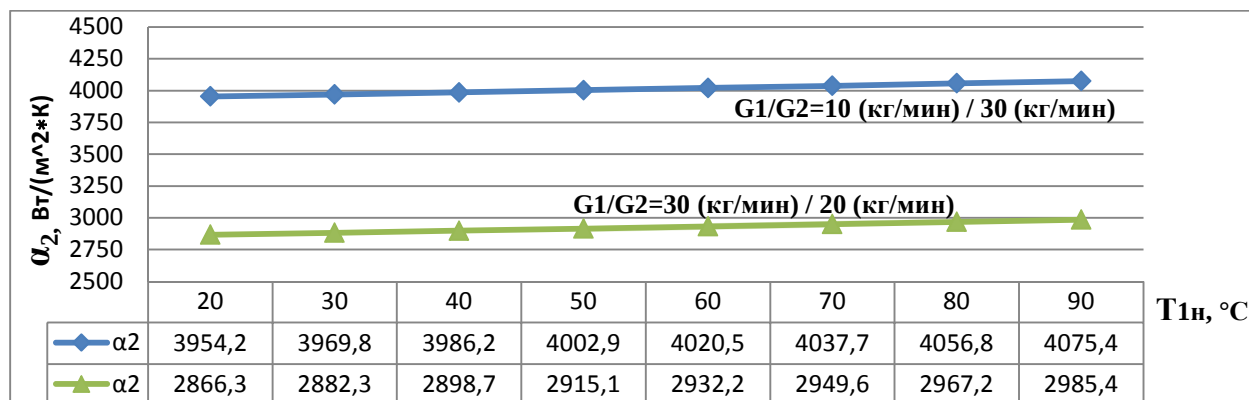


Рис. 5. График изменения α_2 от $T_{1н}$

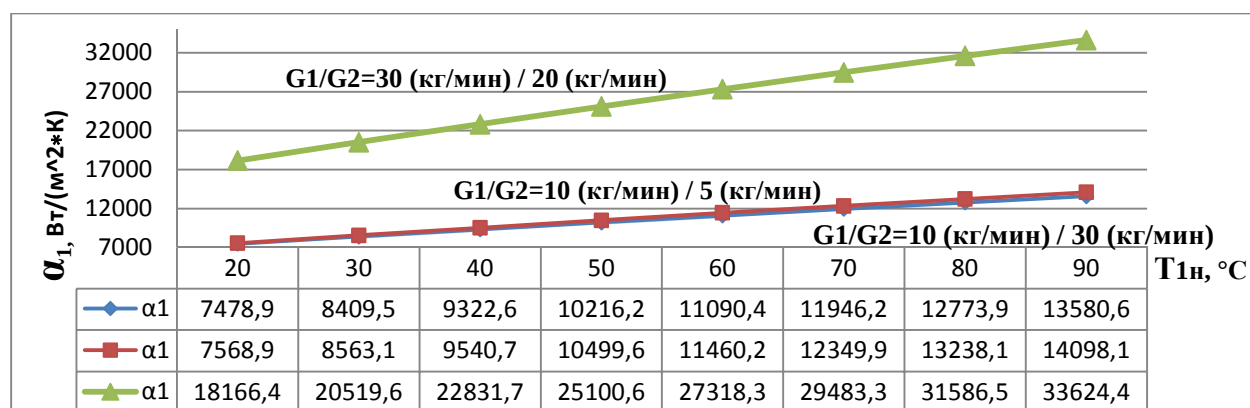


Рис. 6. График изменения α_1 от $T_{1н}$

Из графиков видно, что диапазон изменения α_1 значительно больше диапазона изменения α_2 , это объясняется тем, что коэффициент теплоотдачи является функцией, существенно зависящей от динамической вязкости (μ), которые сильно отличаются для потоков 1 и 2 $\alpha = f(\mu(T))$.

На основании результатов проведенного расчета был спроектирован и изготовлен модельный ТОА, общий вид которого представлен на фотографии (рис. 7).



Рис. 7. Модельный теплообменный аппарат типа «труба в трубе»

Схема привязки модельного ТОА к стенду представлена рис. 8.

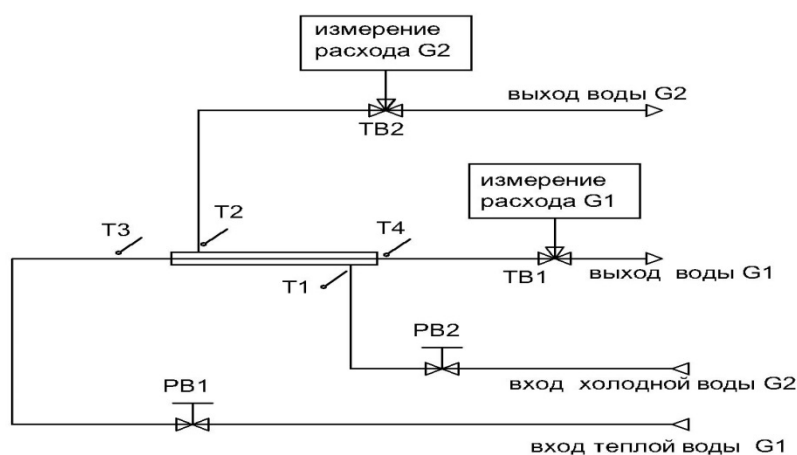


Рис 8. Схема установки

Вода в модельный ТОА поступает из водопровода. Тёплая вода подается по трубе диаметром 12 мм, холодная по трубе диаметром 29 мм. Термометры T_1 , T_3 и T_2 , T_4 размещены на входе и выходе потоков. На входе установлены регулирующие вентили PB_1 и PB_2 , на выходе трёхходовые вентили TB_1 и TB_2 . Вода после ТОА поступает в сосуд фиксированного объёма. Средний расход определяется вручную по времени наполнения заданного визуально, а температура – по термометрам лабораторным.

В установке использованы следующие приборы:

- термометры сопротивления ТС-1388/4 (рис. 9).

Принцип действия термопреобразователей сопротивления основан на изменении электрического сопротивления проводников и полупроводников в зависимости от температуры. Материал, из которого изготавливается такой датчик, должен обладать высоким температурным коэффициентом сопротивления, по возможности линейной зависимостью сопротивления от температуры, хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействиям окружающей среды. В наибольшей степени всем указанным свойствам удовлетворяет платина; в чуть меньшей – медь.

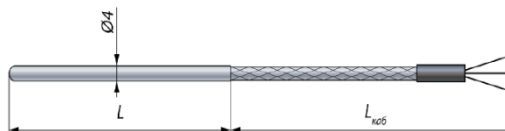


Рис 9. Термометр сопротивления ТС-1388/4

- измеритель двухканальный ТРМ 200-Н (рис. 10).

Отображает на цифровом индикаторе полученные значения температур.

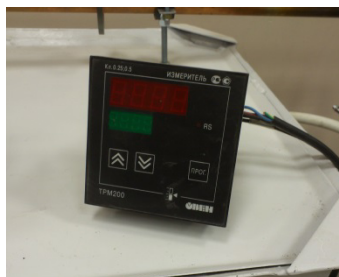


Рис 10. Измеритель двухканальный ТРМ 200-Н

Следует отметить, что для получения более достоверных данных следует предпочесть режим с соотношением расходов $G1/G2=30$ (кг/мин) / 20 (кг/мин), поскольку они обеспечивают более выраженную разницу температур.

В продолжение настоящей работы планируется завершение создания экспериментального стенда в лаборатории кафедры Э4 и проведение серии экспериментов, в результате которых будут получены фактические данные.

Выводы:

1. Создан экспериментальный стенд, позволяющий исследовать характеристики теплообменного аппарата типа «труба в трубе».
2. Установку можно использовать для проведения лабораторных работ.

Список литературы

- [1] Архаров А.М., Архаров И.А., Шевич Ю.А. Теплотехника. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004. 711 с.
- [2] Архаров А.М. Основы криологии. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014. 507 с.
- [3] Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 366 с.
- [4] Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.