

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕ-
ДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор

_____ О.Ю. Долматов
« __ » _____ 2015 г.

КОЖУХОТРУБНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты химических производств» для студентов III курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики

**Составитель: А.С. Кантаев, Ф.А. Ворошилов,
И.Д. Брус**

Издательство
Томского политехнического университета
2015

УДК 66.045.122
ББК Л1/7 35

Кожухотрубный теплообменник: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты химических производств» для студентов III курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Кантаев А.С., Ворошилов Ф.А., Брус И.Д.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 14 с.

УДК 66.045.122
ББК Л1/7 35

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов (№43) ФТИ «___» _____ 20__ г.

Зав. кафедрой ХТРЭ

доктор химических наук, доцент _____ *Р.И.Крайденко*

Председатель

учебно-методической комиссии _____

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

© Кантаев А.С., Ворошилов Ф.А., Брус И.Д.
составление, 2015

Цель работы

1. Ознакомление с теоретическими основами теплообменных аппаратов.
2. Ознакомление с устройством 2-ух ходового кожухотрубчатого теплообменника и исследование его работы.
3. Тепловой и поверочный расчет по результатам экспериментальных данных.

Теоретическая часть

Теплообменные аппараты (теплообменники) – устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя, нагретого до более высокой температуры, к другому.

Теплоноситель – жидкое или газообразное вещество, применяемое для передачи тепловой энергии. Теплоносители, отдающие тепловую энергию в теплообменном аппарате, называют **теплагентами**, поглощающие - **хладагентами**.

Теплообменник – устройство, в котором осуществляется теплообмен между теплоносителями, имеющими различные температуры.

Основопологающие требования к теплообменному оборудованию:

- минимальный расход материалов при изготовлении;
- устойчивость материала к коррозионному действию теплоносителей;
- компактность аппарата при достаточной площади поверхности теплопередачи;
- высокий коэффициент теплопередачи при минимальном гидравлическом сопротивлении;
- надежность и герметичность оборудования;
- легкий доступ к поверхности оборудования для ее очистки от загрязнений;
- доступность деталей и узлов или их унификация.

Теплообменные аппараты классифицируют в зависимости от формы поверхности, вида теплоносителей, способа передачи тепла. В соответствии с последним показателем теплообменники подразделяются на поверхностные, смесительные (контактные), регенеративные (рис. 1).

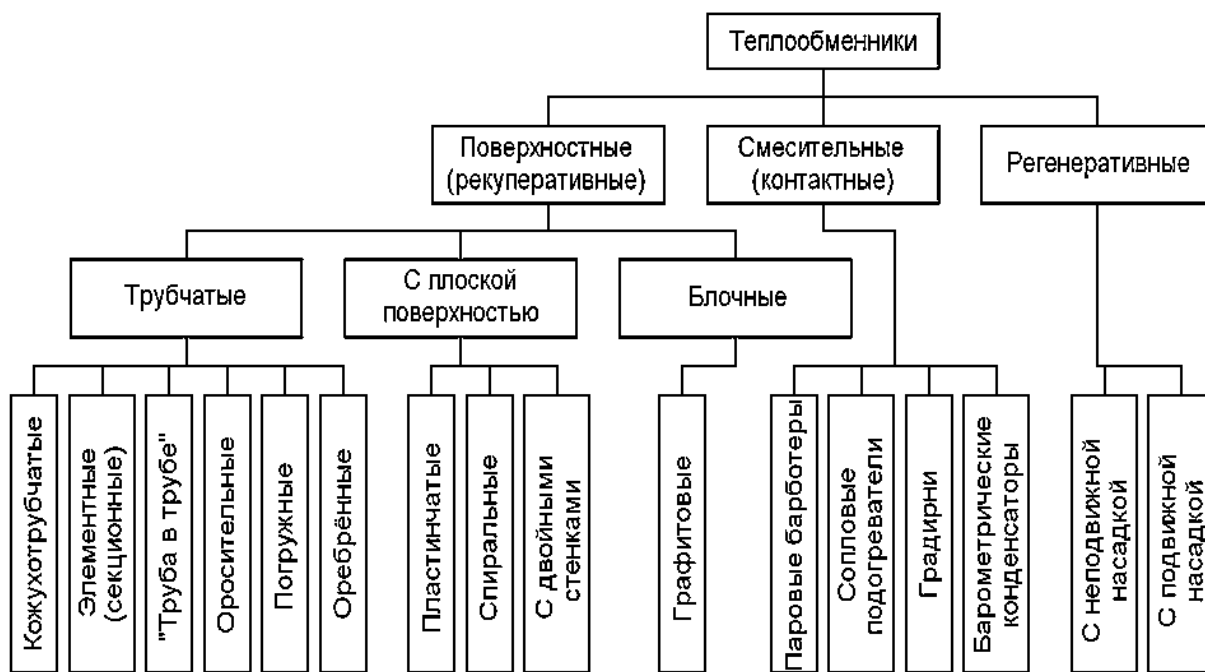


Рисунок 1 – Классификация теплообменных аппаратов

Поверхностные теплообменники представляют собой наиболее значительную группу аппаратов, используемых в химической технологии. В таких аппаратах теплоносители разделены стенкой, сквозь которую тепло передается за счет теплопроводности материала стенки. Главной характеристикой таких аппаратов является площадь поверхности стенки, поскольку именно от ее размера зависит количество тепла, передаваемое в аппарате от одного теплоносителя к другому. Если поверхность теплообмена формируется из труб, то такие теплообменники называют *трубчатыми*. К ним относятся кожухотрубчатые, элементные (секционные), двухтрубчатые («труба в трубе»), оросительные, погружные и оребренные теплообменники. Теплообменники с плоской поверхностью теплопередачи представлены тремя видами аппаратов: пластинчатыми, спиральными теплообменниками и аппаратами с двойными стенками (рубашками). Отдельный подкласс составляют блочные теплообменники, изготавливаемые из графитовых или фторопластовых блоков.

В **смесительных (контактных) теплообменниках** теплообмен происходит при непосредственном соприкосновении теплоносителей. К этому классу относятся аппараты для острого нагрева паром, а также градирни и барометрические конденсаторы.

В **регенеративных теплообменниках** процесс переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному разделяется по времени на два периода. В первый период насадка теплообменника аккумулирует тепло

при прохождении через нее горячего теплоносителя, а затем, во второй период, отдает тепло холодному теплоносителю. Теплообменники этого типа часто применяют для регенерации теплоты отходящих дымовых газов.

По назначению поверхностные теплообменные аппараты подразделяют на следующие типы:

холодильники – теплообменные аппараты, применяемые для охлаждения жидких или газовых сред водой или другим хладагентом;

подогреватели – теплообменные аппараты, применяемые для нагрева жидких или газовых сред жидким теплоносителем или конденсирующимся паром;

конденсаторы – теплообменные аппараты, применяемые для конденсации паров при охлаждении водой или другим хладагентом;

испарители – теплообменные аппараты, применяемые для испарения жидкостей при обогреве паром или жидким высокотемпературным теплоносителем.

Кожухотрубные теплообменники относятся к поверхностным аппаратам непрерывного действия. По конструкции они представляют собой аппараты, выполненные из пучков труб, закрепленных при помощи трубных решеток (досок) и ограниченных кожухом с крышками, снабженными патрубками входа и выхода теплоносителя. Трубное и межтрубное пространства в аппарате разобщены. Теплообменники такого типа предназначены для теплообмена между различными жидкостями, между жидкостями и паром, между жидкостями и газом.

Основной недостаток – большое сечение трубного и межтрубного пространства, что обуславливает невысокие скорости движения теплоносителей и, как следствие, невысокие значения коэффициентов теплоотдачи. Для увеличения скорости движения теплоносителей, теплообменники часто выполняют многоходовыми, устанавливая перегородки в трубном или в межтрубном пространстве.

Основное достоинство - большая удельная поверхность теплообмена.

Некоторые типы кожухотрубных теплообменников представлены на рисунке 2.

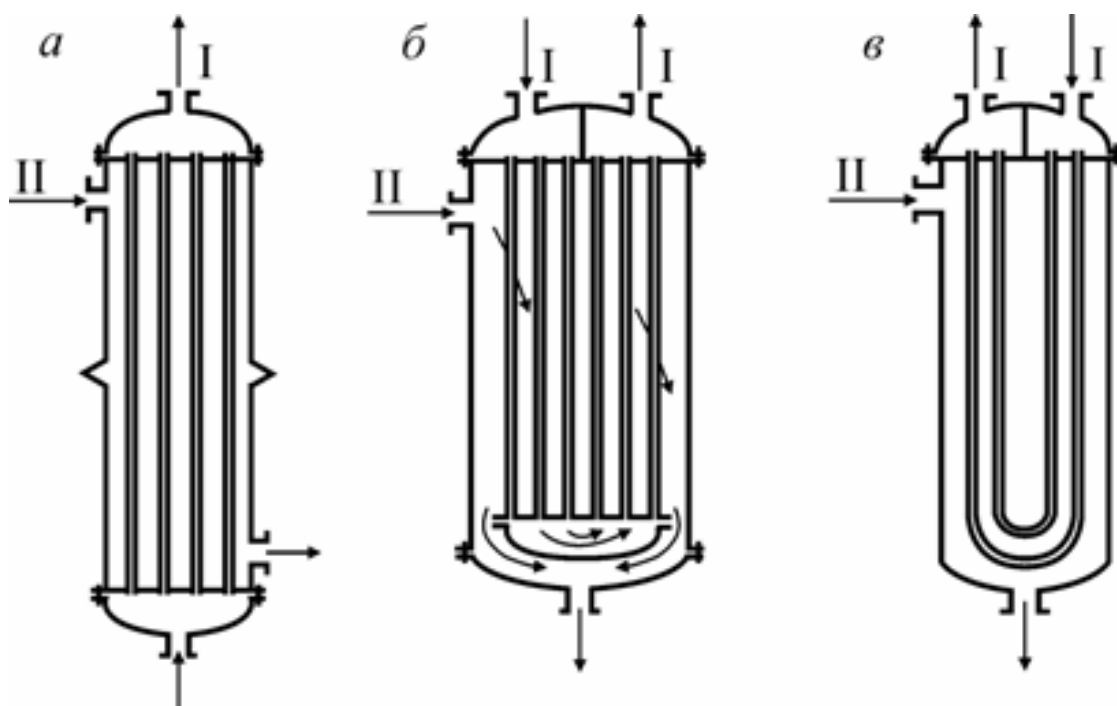


Рисунок 2 – Некоторые типы кожухотрубных теплообменников:

а – одноходовой с линзовым компенсатором; б – многоходовой (двухходовой);

в – с U-образными трубами; I и II – теплоносители.

Экспериментальная часть

Технические характеристики теплообменника

Тип теплообменника	кожухотрубчатый
Число ходов	
Диаметр корпуса	
Длина труб	
Общее число труб	
Число труб в одном ходе	
Диаметр теплообменных труб	
Материал труб	
Коэффициент теплопроводности меди	
Объем мерника конденсата между отметками 0÷100	

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

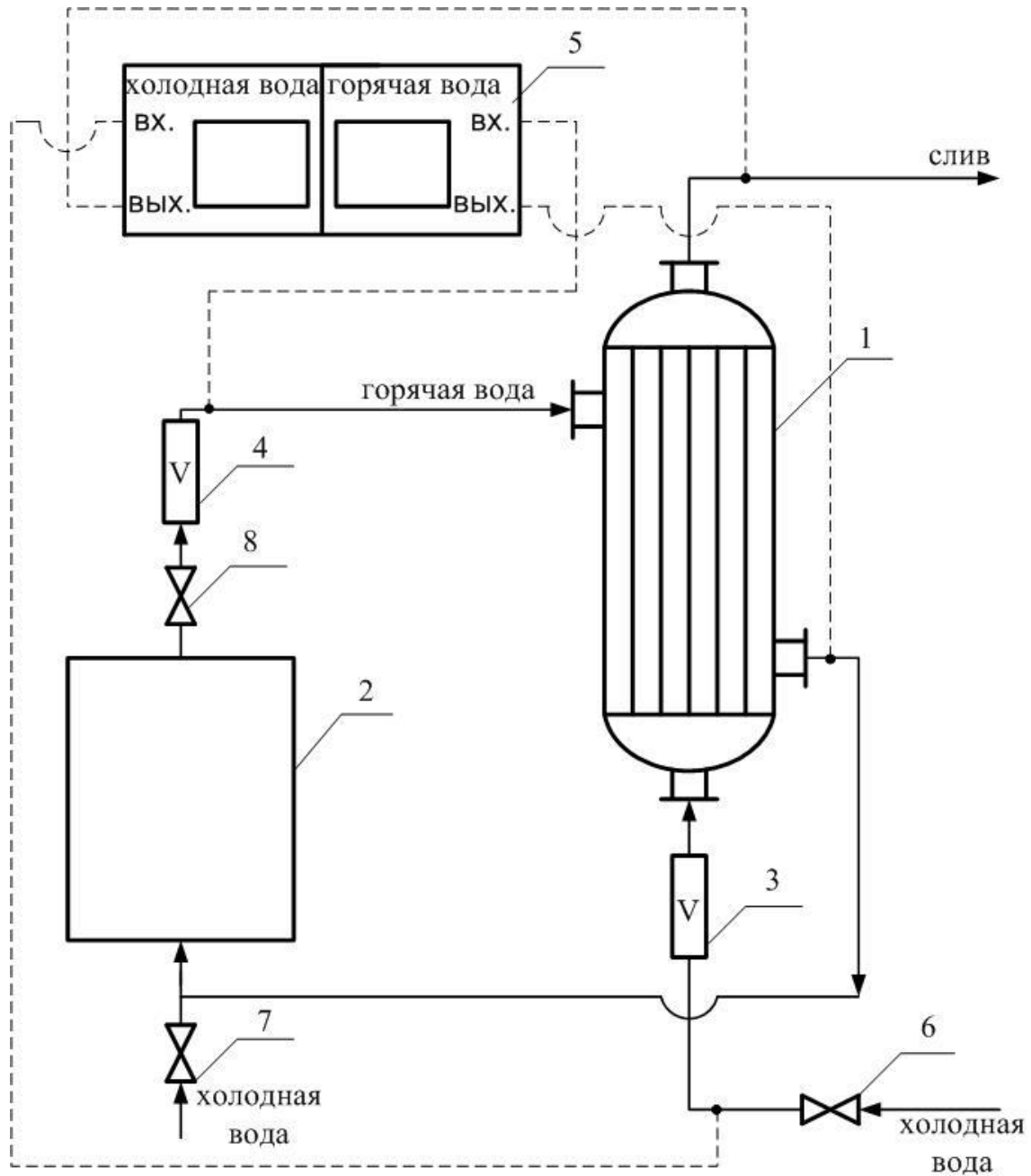


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки:

- 1 – теплообменник кожухотрубчатый; 2 – бойлер; 3, 4 – ротаметры;
5 – термопара сопротивления; 6, 7, 8 – вентили.

Горячая вода поступает из бойлера 2 в межтрубное пространство теплообменника 1, где охлаждается, передавая тепло через стенки труб холодной воде. Холодная вода подается в теплообменник из системы водоснабжения. Подача воды регулируется вентилями 6, 7, 8. Расход горячей и холодной воды измеряется ротаметрами 3, 4. Контроль температуры горячей и холодной воды на входе и выходе осуществляется с помощью термомпары сопротивления 5, данные выводятся на цифровое табло.

Ход работы

Перед началом работы нужно убедиться в наличии воды в бойлере (при недостатке воды, следует открыть вентиль 7 и наполнить бойлер). Открыть вентиль 6 и установить по ротаметру 3 заданный расход холодной воды. Открыть вентиль 8 и установить по ротаметру 4 заданный расход горячей воды. Включить термомпару сопротивления и отслеживать показания для каждой соответствующей точки установки.

Дождаться стационарного режима теплообмена, характеризваемого постоянством во времени каждой фиксируемой температуры.

Отметить расходы и температуры теплоносителей при стационарном теплообмене.

Закончив опыт, выключить прибор регистрации температур, закрыть вентиль 8, а спустя 1÷2 минуты – вентиль 6.

Обработка экспериментальных данных

1. Расход холодной воды через ротаметр 3 определяется по формуле:

$$\dot{V}_1 = \dots + \dots s_1, \quad (1)$$

где \dot{V}_1 – объемный расход холодной воды, м³/с;

s_1 – число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

Расход горячей воды через ротаметр 4 определяется по формуле:

$$\dot{V}_2 = \dots + \dots s_2, \quad (2)$$

где \dot{V}_2 – объемный расход горячей воды, м³/с;

s_2 – число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

2. Рассчитать экспериментальное значение коэффициента теплопередачи ($K_{T, \text{эксн}}$), отнесенного к единице площади наружной поверхности теплообменных труб по формуле:

$$K_T = \frac{Q}{\Delta T \cdot A}, \quad (3)$$

где Q – количество теплоты, передаваемой в единицу времени от одного теплоносителя к другому, или тепловой поток;

$\overline{\Delta T}$ – средняя вдоль поверхности теплообмена разность температур теплоносителей;

A – площадь поверхности теплообмена, вычисляемая по наружному диаметру теплообменных труб.

Количество теплоты, отдаваемой в единицу времени холодным теплоносителем, определяется по формуле:

$$Q_1 = (h_{1н} - h_{1к}) \cdot m_1 = (h_{1н} - h_{1к}) \cdot \rho_{1н} \cdot V_1, \quad (4)$$

а количество теплоты, воспринимаемой в единицу времени горячим теплоносителем, – по формуле:

$$Q_2 = (h_{2к} - h_{2н}) \cdot m_2 = (h_{2к} - h_{2н}) \cdot \rho_{2н} \cdot V_2, \quad (5)$$

где $h_{1н}$ и $h_{1к}$ – удельные энтальпии холодной воды при её начальной и конечной температуре в аппарате, соответственно;

$h_{2н}$ и $h_{2к}$ – удельные энтальпии горячей воды при её начальной и конечной температуре в аппарате, соответственно;

m_1 и m_2 – массовые расходы соответственно холодного и горячего теплоносителей;

V_1 и V_2 – объёмные расходы соответственно холодного и горячего теплоносителей;

$\rho_{1н}$ и $\rho_{2н}$ – плотности соответственно холодного и горячего теплоносителей при их начальных температурах.

Если $Q_1 \approx Q_2$, то результаты лабораторных измерений являются вполне достоверными.

Обычно Q_1 оказывается немного больше Q_2 , что объясняется теплообменом холодной воды с окружающей средой через стенку кожуха.

Для определения коэффициента теплопередачи рекомендуется принять:

$$Q = Q_2.$$

Средняя движущая сила теплопередачи (средняя разность температур теплоносителей в аппарате) определяется уравнением:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_{н} - \Delta T_{к}}{\ln \frac{\Delta T_{н}}{\Delta T_{к}}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{н} = T_{1н} - T_{2к}$; $\Delta T_{к} = T_{1к} - T_{2н}$.

3. Полученное экспериментально значение коэффициента теплопередачи сравнивается со значением, рассчитанным по уравнению аддитивности термических сопротивлений:

$$K_T = \left(\frac{1}{\alpha_H} + \frac{d_H}{2 \cdot \lambda_{CT}} \cdot \ln \frac{d_H}{d_{BH}} + \frac{1}{\alpha_{BH}} \frac{d_H}{d_{BH}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где α_H и α_{BH} – коэффициенты теплоотдачи соответственно с наружной и внутренней стороны теплообменных труб;

d_H и d_{BH} – диаметры соответственно наружный и внутренний теплообменной трубы;

λ_{CT} – теплопроводность материала теплообменной трубы (стенки).

Для этого необходимо рассчитать коэффициенты теплоотдачи α_H и α_{BH} .

3.1. Расчёт коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообменной трубы к холодной воде ($\alpha_1 = \alpha_{BH}$) рекомендуется выполнять в следующем порядке:

а) определить физические свойства холодной воды (в частности, плотность – ρ_1 ; динамическую вязкость – μ_1 ; теплопроводность – λ_1) и критерий Прандтля при ее средней температуре в теплообменнике. Средняя температура холодного теплоносителя рассчитывается по формуле:

$$\bar{T}_1 = \frac{\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \cdot (T_{2K} + \bar{\Delta T}) - T_{1H}}{\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} - 1}. \quad (8)$$

Здесь и далее через ΔT_1 и ΔT_2 обозначены конечные изменения температур сред, то есть $\Delta T_1 = T_{1H} - T_{2K}$; $\Delta T_2 = T_{1K} - T_{2H}$.

б) рассчитать среднюю скорость воды в теплообменных трубах и число Рейнольдса (Re_1);

в) рассчитать число Нуссельта (Nu_1), используя одно из приведенных ниже критериальных уравнений (в зависимости от гидродинамического режима течения теплоносителя):

✓ при $Re < 2300$ и $Ra > 8 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{0,1} Re^{0,32} Pr^{0,33} (Pr/Pr_{CT})^{0,25}; \quad (9)$$

✓ при $Re < 2300$ и $Ra < 8 \cdot 10^5$

$$Nu = 1,4 \cdot Re^{0,4} Pr^{0,33} (l/L)^{0,4} (Pr/Pr_{CT})^{0,25}; \quad (10)$$

✓ при $2300 < Re < 10000$

$$Nu = 0,0235 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,33} - 0,8) \cdot [1 + (l/L)^{2/3}] \cdot (\mu/\mu_{ст})^{0,25}; \quad (11)$$

✓ при $Re > 10000$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_{ст})^{0,25}. \quad (12)$$

где $Ra = \frac{d^3 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot \lambda} \beta |T - T_{ст}|$ – критерий Рэлея; $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ – критерий Прандтля; l – определяющий линейный размер, $l = d_э$ – эквивалентный диаметр канала, численно равный внутреннему диаметру теплообменных труб, то есть $d_э = d_{вн}$; L – длина теплообменных труб; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость; c_p – удельная теплоемкость; λ – теплопроводность; β – коэффициент объемного температурного расширения.

В уравнениях (9)...(12) все физические свойства среды (кроме помеченных индексом «ст») определяются при средней вдоль поверхности теплообмена температуре теплоносителя; индекс «ст» означает, что свойства среды определяются при температуре стенки.

Поскольку температуры теплообменных поверхностей в данном аппарате не измеряются, рекомендуется сделать следующие предположения:

$$\overline{T_{ст1}} \approx \overline{T_{ст2}} \text{ и } \alpha_1 \approx \alpha_2 \text{ (или иначе } \alpha_{вн} \approx \alpha_{н}). \quad (13)$$

Тогда может быть вычислена средняя температура стенки со стороны холодного теплоносителя:

$$\overline{T_{ст1}} \approx \overline{T_1} - \frac{\overline{\Delta T}}{2}, \quad (14)$$

что позволяет определить свойства воды и соответствующие критерии при данной температуре;

г) рассчитать коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_э}. \quad (15)$$

3.2. Расчет коэффициента теплоотдачи от горячей воды к поверхности теплообменных труб ($\alpha_2 = \alpha_{н}$) рекомендуется выполнять в следующем порядке:

а) определить физические свойства горячей воды (в частности, плотность – ρ_2 ; динамическую вязкость – μ_2 ; теплопроводность – λ_2) и критерий Прандтля при ее средней температуре в теплообменнике.

Средняя температура горячего теплоносителя рассчитывается по формуле:

$$\bar{T}_2 = \frac{\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \cdot T_{2к} + \bar{\Delta T} - T_{1н}}{\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} - 1}. \quad (16)$$

б) рассчитать число Рейнольдса (Re_2). Скорость потока, входящая в число Рейнольдса, определяется по формуле:

$$v_2 = \frac{m_2}{\rho_2 \cdot S_{\text{мтр}}}, \quad (17)$$

где $S_{\text{мтр}} = \dots \text{ м}^2$ – расчетная площадь проходного сечения в межтрубном пространстве.

в) рассчитать число Нуссельта (Nu_2). Принимая во внимание нестандартное размещение сегментных перегородок в межтрубном пространстве аппарата и, как следствие, существенное различие в площадях проходных сечений в разных местах этого пространства¹, коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к потоку воды в данном конкретном аппарате рекомендуется определять из уравнения:

$$Nu = 0,308 \cdot Re^{0,6} Pr^{0,32} (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}. \quad (18)$$

где Pr – критерий Прандтля; l – определяющий линейный размер, $l = d_{\text{н}}$ – наружный диаметр теплообменной трубы.

При расчете Нуссельта необходимо знать температуру стенки. Тогда:

$$\bar{T}_{\text{ст2}} \approx \bar{T}_2 + \frac{\bar{\Delta T}}{2}; \quad (19)$$

г) рассчитать коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_3}. \quad (20)$$

3.3. Определить по соответствующим справочникам теплопроводность материала теплообменной трубы при ее средней температуре, которую с достаточной точностью можно считать равной:

¹ В данном аппарате площадь проходного сечения между перегородками $S_{\text{м/пер}} = (D_{\text{вн}} - n_{\text{д}} \cdot d_{\text{н}}) \cdot l_{\text{п}} = (0,106 - 5 \cdot 0,013) \cdot 0,160 = 0,00656 \text{ м}^2$, а площадь проходного сечения в вырезе перегородки $S_{\text{в. пер}} = 0,00177 \text{ м}^2$.

$$\overline{T}_{ст} = \frac{\overline{T}_{ст1} + \overline{T}_{ст2}}{2}. \quad (21)$$

3.4. Рассчитать коэффициент теплопередачи ($K_{T,расч}$) по формуле (7).

Результат этого расчета обычно значительно превышает величину коэффициента теплопередачи, полученного в эксперименте.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

s_1	$V_1,$ м ³ /с	$m_1,$ кг/с	$T_{1н},$ °С	$T_{1к},$ °С	$Q_1,$ Вт	$v_1,$ м/с	Re_1	Nu_1	$\alpha_1,$ Вт/(м ² · К)	$K_{T,расч},$ Вт/(м ² · К)
s_2	$V_2,$ м ³ /с	$m_2,$ кг/с	$T_{2н},$ °С	$T_{2к},$ °С	$Q_2,$ Вт	$v_2,$ м/с	Re_2	Nu_2	$\alpha_2,$ Вт/(м ² · К)	$K_{T,экп},$ Вт/(м ² · К)

Проанализировать полученные значения кинетических коэффициентов теплообмена и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

Учебное издание

КОЖУХОТРУБЧАТЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу
«Оборудование производств редких элементов» для студентов III курса,
обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материа-
лов современной энергетики

Составители

доцент, к.т.н. А.С. Кантаев
доцент, к.т.н. Ф.А. Ворошилов
доцент, к.т.н. И.Д. Брус


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 01.03.2015. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ 1153 Тираж 10 экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического универ-
ситета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO
9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru