

**О.П. Банных, Е.И. Борисова**

**КУРСОВАЯ РАБОТА  
РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ ПЛОЩАДИ  
ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА**



**Санкт-Петербург**

**2017**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**О.П. Банных, Е.И. Борисова**

**КУРСОВАЯ РАБОТА  
РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ ПЛОЩАДИ  
ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика, 18.04.02 Энерго- и  
ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии в  
качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных  
программ высшего образования магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2017**

Банных, О.П. Курсовая работа. Расчет необходимой площади поверхности теплообмена. Учебное пособие / О.П. Банных, Е.И. Борисова. - СПб., Университет ИТМО, 2017. – 46 с.

**Рецензент:** Флисюк Олег Михайлович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой процессов и аппаратов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)"

Пособие адресовано студентам, обучающимся по направлениям 16.04.01, «Техническая физика», 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и содержит основные зависимости и формулы для расчета теплообменных аппаратов, требования к составу и оформлению курсовой работы. Приведены задания на курсовую работу, подробные примеры расчетов и необходимые справочные данные.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017  
© Банных О.П., 2017  
© Борисова Е.И., 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Состав и содержание курсовой работы.....	4
2 Оформление курсовой работы .....	5
3 Основные зависимости и расчетные формулы .....	5
4 Расчет коэффициентов теплоотдачи методом последовательных приближений.....	10
5 Примеры расчета .....	12
6 Задание на курсовую работу .....	26
7 Литература .....	29
Приложение А (обязательное). Справочные данные.....	30

# Введение

Теплообменные процессы используются в химической технологии для обеспечения заданных температурных режимов протекания процессов выпаривания, сушки, ректификации, абсорбции, адсорбции, кристаллизации, химических процессов.

Для проведения теплообменных процессов применяются теплообменные аппараты различной конструкции. В промышленности широко распространены аппараты с трубчатой поверхностью теплообмена, так как они достаточно просты в изготовлении, надежны в эксплуатации и универсальны по назначению, то есть могут быть использованы для реализации теплообмена между газами, парами, жидкостями в широком диапазоне их давлений и температур.

## 1 Состав и содержание курсовой работы

Целью курсовой работы является систематизация, закрепление и расширение теоретических знаний, а также развитие навыков самостоятельной работы. Структурными элементами курсовой работы являются:

- титульный лист;
- задание на курсовую работу;
- содержание;
- введение;
- аналитический обзор;
- цели и задачи работы;
- инженерные расчеты;
- выводы по работе;
- список использованных источников;
- приложение.

Во «Введении» дается обоснование актуальности темы курсовой работы и формулируется основная цель выполняемой работы (в соответствии с индивидуальным заданием).

Раздел «Аналитический обзор» содержит анализ современного состояния теплообменной аппаратуры. В процессе работы над составлением аналитического обзора студент должен изучить не только рекомендованные в задании литературные источники, но и рассмотреть другие материалы, относящиеся к теме курсовой работы.

В разделе «Цель и задачи работы» формулируются конкретная цель работы и задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

Раздел «Инженерные расчеты» содержит расчеты материальных и тепловых балансов и расчеты по кинетическим соотношениям, позволяющим определить необходимые размеры теплообменного аппарата.

В «Выводах по работе» приводятся основные результаты выполненной курсовой работы.

«Список использованных источников» включает литературные источники, на которые дается ссылка в тексте курсовой работы.

В «Приложениях» приводятся сведения, не вошедшие в раздел «Инженерные расчеты», но необходимые для документального подтверждения обоснованности сделанных выводов.

## 2 Оформление курсовой работы

Оформление курсовой работы должно выполняться с учетом требований к оформлению отчета о научно-исследовательской работе по ГОСТ 7.32 – 2001.

Текст курсовой работы следует печатать на одной стороне листа бумаги формата А4 через полтора интервала, соблюдая следующие размеры полей: правое-10 мм, левое, верхнее и нижнее - 20 мм. Размер шрифта и других знаков – не менее 1,8 мм (кегель не менее 12).

Курсовая работа подразделяется на разделы, подразделы и пункты, которые нумеруются арабскими цифрами. После номера раздела, подраздела, пункта в тексте точку не ставят. «Введение» и «Выводы по работе» не являются разделами и, соответственно, не нумеруются.

Страницы следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа без точки. Первой страницей курсовой работы является титульный лист, второй – Задание. Номера страниц на титульном листе и на задании не проставляются. Первая страница текста имеет номер 3.

Нумерация таблиц и рисунков должна быть сквозной.

Оформление таблиц и рисунков должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.32-2001.

Специальные термины и обозначения, используемые в тексте, должны соответствовать действующим стандартам, а при отсутствии последних – принятым в научно-технической литературе.

Все данные, поясняющие текст или расчет (цифровой материал, уравнения и др.), заимствованные из различных источников (в том числе, из сети Интернет), должны иметь соответствующие ссылки.

Список использованных источников должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003.

Наименования и обозначения единиц должны соответствовать ГОСТ 8.417-2003.

## 3 Основные зависимости и расчетные формулы

В теплообменных аппаратах с трубчатой поверхностью теплообмена перенос теплоты между теплоносителями, движущимися по трубному и межтрубному пространствам, протекает через разделяющие теплоносители поверхность труб. Такой процесс теплообмена называется теплопередачей [1].

### 3.1 Уравнение теплопередачи

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, передаваемой от горячего теплоносителя к холодному за единицу времени, Вт;

$K$ -коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$F$ -площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  - средняя разность температур между теплоносителями, К (°С).

### 3.2 Тепловая нагрузка аппарата

Тепловая нагрузка аппарата определяется по уравнению теплового баланса.

Вид расчетного соотношения зависит от того, изменяется агрегатное состояние теплоносителя в процессе теплообмена или нет.

Если агрегатное состояние теплоносителя в процессе теплообмена не изменяется, то для процесса охлаждения:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_{нач.} - t_{кон.}), \quad (2)$$

где  $Q$  - тепловая нагрузка аппарата, Вт;

$G$  - массовый расход теплоносителя, кг/с;

$c$  - удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К;

$t_{нач.}$ ,  $t_{кон.}$  - начальная и конечная температуры теплоносителя.

Для процесса нагревания теплоносителя

$$Q = G \cdot c \cdot (t_{кон.} - t_{нач.}) \quad (3)$$

При изменении агрегатного состояния теплоносителя (конденсация насыщенного пара, кипение жидкости)

$$Q = G \cdot r, \quad (4)$$

где  $r$  - удельная теплота конденсации (парообразования), Дж/кг.

### 3.3 Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{ст.} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи теплоносителей, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\sum r_{ст.}$  - суммарное термическое сопротивление стенки, м<sup>2</sup>·К/Вт.

$$\sum r_{ст.} = r_{загр.1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст.}} + r_{загр.2}, \quad (6)$$

где  $r_{загр.1}$ ,  $r_{загр.2}$  - термические сопротивления слоев загрязнений стенки, м<sup>2</sup>·К/Вт;

$\delta$  - толщина стенки, м;

$\lambda_{ст.}$  - коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/м·К.

### 3.4 Основные критерии подобия, входящие в критериальные уравнения конвективной теплоотдачи

Критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (7)$$

где  $Nu$  - критерий Нуссельта;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$l$  – определяющий геометрический размер м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/м·К.

#### Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (8)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля;  
 $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К;  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости теплоносителя, Па·с.

#### Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot l \cdot \rho}{\mu}, \quad (9)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  
 $\omega$  – средняя скорость теплоносителя, м/с;  
 $l$  – определяющий геометрический размер, м;  
 $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>.

### **3.5 Критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи без фазовых превращений теплоносителя**

#### **3.5.1 Теплоотдача при турбулентном течении в прямых трубах и каналах (Re > 10000)**

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm.}} \right)^{0.25} \quad (10)$$

Определяющая температура для расчета критериев  $Nu$ ,  $Pr$ ,  $Re$  – средняя температура теплоносителя.

При вычислении значения критерия  $Pr_{cm.}$  теплофизические свойства теплоносителя определяются при температуре стенки.

Определяющий геометрический размер  $l$  – эквивалентный диаметр ( $d_3$ ).

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi} \quad (11)$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр;  
 $S$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  
 $\Pi$  – смоченный периметр, м.

Для газов расчетное соотношение (10) упрощается. Так как критерий  $Pr$  для газа является величиной приблизительно постоянной, независимой от температуры и давления, то можно принять, что  $Pr/Pr_{cm.} = 1$ , а значение критерия  $Pr$  зависит только от атомности газа. Приближенные значения критерия  $Pr$  для газов, рекомендуемые для расчетов, приведены в таблице 1.



Таблица 1 - Значения критерия  $Pr$  для газов

Газ	Критерий $Pr$
Одноатомный	0.67
Двухатомный	0.72
Трехатомный	0.8
Четырех- и многоатомные	1.0

Для воздуха рекомендуется соотношение

$$Nu = 0.018 \cdot Re^{0.8} \quad (12)$$

### 3.5.2 Теплоотдача при поперечном обтекании теплоносителем пучка гладких труб

Для шахматных пучков при  $Re > 1000$

$$Nu = 0.4 \cdot \varepsilon_{\varphi} Re^{0.6} \cdot Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm.}} \right)^{0.25}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_{\varphi}$  – коэффициент, учитывающий влияние угла атаки.

При движении теплоносителя в межтрубном пространстве кожухотрубчатого теплообменника с поперечными перегородками усредненная величина  $\varepsilon_{\varphi} = 0.6$ .

При расчете критериев подобия определяющая температура – средняя температура теплоносителя, определяющий геометрический размер  $l$  – наружный диаметр трубы.

При вычислении значения критерия  $Pr_{cm.}$  теплофизические свойства теплоносителя определяются при температуре стенки.

Для газов уравнение (13) упрощается, в частности, для воздуха:

$$Nu = 0.356 \cdot \varepsilon_{\varphi} Re^{0.6} \quad (14)$$

### 3.6 Критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи при изменении агрегатного состояния теплоносителя

#### 3.6.1 Теплоотдача при пленочной конденсации водяного пара на наружной поверхности вертикальных труб

$$\alpha = 2.04 \cdot \frac{A_t}{\sqrt[4]{H \cdot (t_{zp.n.} - t_{cm.})}}, \quad (15)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара,  $Вт/м^2 \cdot К$ ;

$A_t$  – коэффициент, численное значение приведено в таблице 2;

$H$  – длина труб, м;

$t_{zp.n.}$  – температура конденсации греющего пара,  $^{\circ}С$ ;

$t_{cm1}$  – температура поверхности стенки, соприкасающейся с пленкой конденсата,  $^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 2 – Коэффициент  $A_t$

Температура конденсации водяного пара, $^{\circ}\text{C}$	100	110	120	140	160	180
$A_t$	6960	7100	7240	7420	7490	7520

### 3.6.2 Теплоотдача при кипении жидкости

$$\alpha = b^3 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot (t_{cm2} - t_{кип.})^2 \cdot \rho}{\mu \cdot \sigma \cdot T_{кип.}}, \quad (16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности вертикальных труб к кипящей жидкости,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  
 $b$  – численный коэффициент;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости при температуре кипения  $t_{кип.}$ ,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ;  
 $\rho$  – плотность жидкости при температуре кипения  $t_{кип.}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости при температуре кипения  $t_{кип.}$ ,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  
 $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости при температуре кипения  $t_{кип.}$ ,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  
 $t_{кип.}$  – температура кипения жидкости,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $T_{кип.}$  – температура кипения жидкости,  $\text{К}$ ;  
 $t_{cm2}$  – температура поверхности стенки, соприкасающейся с кипящей жидкостью,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$b = 0.075 + 0.75 \cdot \left( \frac{\rho_n}{\rho - \rho_n} \right)^{2/3}, \quad (17)$$

где  $\rho_n$  – плотность насыщенного водяного пара при  $t_{кип.}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

### 3.7 Средняя разность температур теплоносителей

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)}, \quad (18)$$

где  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – разности температур теплоносителей на концах теплообменника.

Величина средней разности температур зависит от взаимного направления движения теплоносителей. Типовые схемы изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (температурные схемы) приведены на рисунке 1.

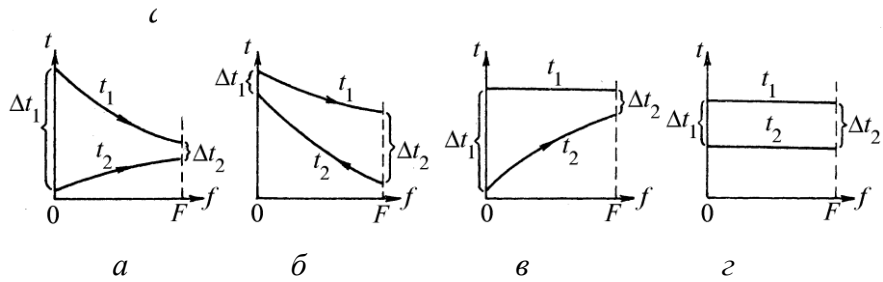


Рисунок 1 - Изменение температур  $t_1$  и  $t_2$  теплоносителей вдоль поверхности теплопередачи. *a* – прямоток; *б* – противоток; *в* – конденсация ( $t_1$ ) и нагрев ( $t_2$ ); *г* – конденсация ( $t_1$ ) и кипение ( $t_2$ )

### 3.8 Определение средних температуры теплоносителей

Для теплоносителя, температура которого в теплообменнике изменяется на меньшее число градусов, средняя температура  $t_{cp,1}$  определяется как средняя арифметическая между начальной  $t_{нач.}$  и конечной  $t_{кон.}$  температурами:

$$t_1 = \frac{t_{нач.} + t_{кон.}}{2} \quad (19)$$

Для другого теплоносителя среднюю температуру находят по формуле:

$$t_2 = t_1 \pm \Delta t_{cp}. \quad (20)$$

Это уравнение справедливо и тогда, когда температура первого теплоносителя постоянна вдоль поверхности теплообмена.

### 4 Расчет коэффициентов теплоотдачи методом последовательных приближений

Расчетные соотношения для коэффициентов теплоотдачи зависят от вида конвективного теплообмена, геометрических характеристик аппарата, физических свойств теплоносителей и режимов их движения [1,2].

Так как в критериальные уравнения входят неизвестные температуры поверхностей стенок, соприкасающихся с теплоносителями, то расчет коэффициентов теплоотдачи проводится методом последовательных приближений с использованием системы уравнений [ 3 ]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= f_1(w_1, d_1, \mu_1, \rho_1, \lambda_1, t_1, t_{cm,1}) \\ \alpha_2 &= f_2(w_2, d_2, \mu_2, \rho_2, \lambda_2, t_2, t_{cm,2}) \\ q_1 &= \alpha_1 \cdot (t_1 - t_{cm,1}) = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \\ q_2 &= \alpha_2 \cdot (t_{cm,2} - t_2) = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \\ q_{cm} &= \frac{(t_{cm,1} - t_{cm,2})}{\sum r_{cm}} = \frac{\Delta t_{cm}}{\sum r_{cm}} \end{aligned} \quad (21)$$

Заменим последнее уравнение системы (21) уравнением теплопередачи:

$$q = K \cdot \Delta t_{cp}$$

Тогда получим следующую систему уравнений:

$$\alpha_1 = f_1(w_1, d_1, \mu_1, \rho_1, \lambda_1, t_1, t_{cm.1}) \quad (22)$$

$$\alpha_2 = f_2(w_2, d_2, \mu_2, \rho_2, \lambda_2, t_2, t_{cm.2}) \quad (23)$$

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (t_1 - t_{cm.1}) = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \quad (24)$$

$$q_2 = \alpha_2 \cdot (t_{cm.2} - t_2) = \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \quad (25)$$

$$q = K \cdot \Delta t_{cp} \quad (26)$$

Рекомендуется следующая последовательность расчета коэффициентов теплоотдачи:

1. в соответствии с п. 3.4-3.6 выбрать критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи и привести их к виду  $\alpha = A \cdot (\text{Pr}/\text{Pr}_{cm})^n$  (при нагревании и охлаждении) или  $\alpha = B \cdot \Delta t^n$  (при конденсации или кипении), где А, В – коэффициенты, состоящие из линейных размеров, физических величин, не зависящих от температуры стенки ( $t_{ст.1}$ ,  $t_{ст.2}$ );
2. выбрать начальные приближения  $t_{ст.1}$  и  $t_{ст.2}$ , удовлетворяющие условию:  $t_2 < t_{ст.2} < t_{ст.1} < t_1$ ;
3. рассчитать  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  по уравнениям (22), (23);
4. рассчитать  $q_1$ ,  $q_2$  по уравнениям (24), (25);
5. рассчитать  $K$ ,  $\Delta t_{cp}$  по уравнениям (5), (18);
6. рассчитать  $q$  по уравнению (26).

Сопоставить величины  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q$ , определив расхождение  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\max(q_1, q_2, q) - \min(q_1, q_2, q)}{q} \quad (27)$$

При  $\varepsilon > 0.05$  выполняют расчет во втором приближении, определив новые значения  $t_{ст.1}$  и  $t_{ст.2}$ :

$$t_{cm.1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} \quad (28)$$

$$t_{cm.2} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2} \quad (29)$$

Процесс продолжают до тех пор, пока не выполнится условие:  $\varepsilon \leq 0.05$ . Обычно требуется не более трех итераций. Больше число приближений свидетельствует об ошибках в алгоритме или в вычислениях.

При достижении условия  $\varepsilon \leq 0.05$  вычисляют расчетное значение поверхности теплопередачи:  $F = Q/q$ .

## 5 Примеры расчета

### 5.1 Пример расчета теплообменника «труба в трубе»

#### 5.1.1 Исходные данные для расчета

На складе оборудования имеется стальной теплообменник «труба в трубе», с площадью поверхности теплообмена  $F_{ann} = 6.23 \text{ м}^2$ . Диаметр теплообменной трубы  $d = 48 \times 4 \text{ мм}$ , кожуховой  $D = 76 \times 4 \text{ мм}$ . Площади проходных сечений: теплообменной трубы  $S_m = 12.6 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  и кольцевого пространства  $S_k = 18.2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ . Достаточно ли площадь теплообменной поверхности этого аппарата для охлаждения этанола, поступающего во внутреннюю трубу теплообменника, от  $t_n = 73^\circ \text{ C}$  до  $t_k = 35^\circ \text{ C}$  водой, которая подается в кольцевое пространство. Температура воды меняется от  $t_g^H = 15^\circ \text{ C}$  до  $t_g^K = 30^\circ \text{ C}$ . Расход этанола  $G = 0.75 \text{ кг/с}$ . Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

#### 5.1.2 Пример расчета

Определяем среднюю разность температур в теплообменнике по формуле (18). Выбираем противоточное направление течения теплоносителей, при этом:

$$\begin{aligned}\Delta t_{\delta} &= 73 - 30 = 43^\circ \text{ C}, \\ \Delta t_{\mu} &= 35 - 15 = 20^\circ \text{ C}, \\ \Delta t_{cp} &= \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} = \frac{43.2 - 20}{\ln \frac{43.2}{20}} = 30.08^\circ \text{ C},\end{aligned}$$

где  $\Delta t_{\delta}$  - большая разность температур;  
 $\Delta t_{\mu}$  - меньшая разность температур;  
 $\Delta t_{cp}$  - средняя разность температур.

Температура воды меняется на меньшее число градусов, следовательно, её среднюю температуру определяем как среднее арифметическое по формуле (19):

$$t_g^{cp} = \frac{t_g^H + t_g^K}{2} = \frac{15 + 30}{2} = 22.5^\circ \text{ C},$$

где  $t_g^{cp}$  - средняя температура воды.

Среднюю температуру этанола рассчитываем по формуле (20):

$$t_{cp}^m = \Delta t_{cp} + t_g^{cp} = 30.08 + 22.5 = 52.58^\circ \text{ C}.$$

Определяем количества тепла передаваемого в холодильник от этанола к воде по формуле (2). Теплоёмкость этанола находим по номограмме на рисунке А.4 при его средней температуре ( $t_{cp}^m = 52.58^\circ \text{ C}$ ):  $c_{эм} = 2866 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ .

$$Q = G c_{эм} (t_n - t_k) = 0.75 \times 2866 \times (73 - 35) = 81690 \text{ Вт},$$

где  $Q$  - количество передаваемого тепла, Вт.

Определяем массовый расход воды, необходимый для охлаждения этанола по формуле (3). Теплоёмкость воды при её средней температуре ( $t_g^{cp} = 22.5^\circ \text{C}$ ) по номограмме на рисунке А.4 равна:  $c_g = 4190 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ .

Расход воды находим следующим образом:

$$G_g = \frac{Q}{c_g (t_g^k - t_g^h)} = \frac{81690}{4190 \times (30 - 15)} = 1.3 \text{ кг/с},$$

где  $G_g$  - расход воды,  $\text{кг/с}$ .

Плотность воды при её средней температуре ( $t_g^{cp} = 22.5^\circ \text{C}$ ) определяем по таблице А.1:  $\rho_g = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Плотность этанола при его средней температуре ( $t_{cp}^{эм} = 52.58^\circ \text{C}$ ) в соответствии с таблицей А.1:  $\rho_{эм} = 756.2 \text{ кг/м}^3$ .

Этанол направляем во внутреннюю трубу, воду - в кольцевое пространство.

Скорость этанола определяем как:

$$w_{эм} = \frac{G_{эм}}{S_m \rho_{эм}} = \frac{0.75}{12.6 \times 10^{-4} \times 756.2} = 0.79 \text{ м/с},$$

где  $S_m = 12.6 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  - площадь проходного сечения теплообменной трубы.

Скорость воды рассчитываем аналогично:

$$w_g = \frac{G_g}{S_k \rho_g} = \frac{1.3}{18.2 \times 10^{-4} \times 1000} = 0.71 \text{ м/с},$$

где  $S_k = 18.2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  - площадь проходного сечения кольцевого пространства.

Полученные скорости не выходят за допустимые пределы.

Для оценки режимов течения этанола и воды необходимо определить динамические коэффициенты вязкости этанола и воды по номограмме на рисунке А.1.

Динамический коэффициент вязкости этанола при средней температуре ( $t_{cp}^{эм} = 52.58^\circ \text{C}$ ) равен:  $\mu_{эм} = 6.65 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Динамический коэффициент вязкости воды при её средней температуре ( $t_g^{cp} = 22.5^\circ \text{C}$ ):  $\mu_g = 9.9 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Критерий Рейнольдса для этанола во внутренней трубе по формуле (9):

$$\text{Re}_{эм} = \frac{w_{эм} \rho_{эм} d^{вн}}{\mu_{эм}} = \frac{0.79 \times 756.2 \times 0.04}{6.65 \times 10^{-4}} = 35900,$$

где  $\text{Re}_{эм}$  - критерий Рейнольдса для этанола

$d^{вн} = 0.048 - 2 \times 0.004 = 0.04 \text{ м}$  - внутренний диаметр трубы.

Критерий Рейнольдса для воды в кольцевом пространстве по формуле (9):

$$\text{Re}_e = \frac{w_e \rho_e d^{\text{кольца}}}{\mu_e} = \frac{0.71 \times 1000 \times 0.02}{9.9 \times 10^{-4}} = 14400,$$

где  $d^{\text{кольца}} = 0.076 - 2 \times 0.004 - 0.048 = 0.02$  м эквивалентный диаметр для кольцевого пространства.

Рассчитанные значения критериев Рейнольдса для этанола и для воды больше 10000, следовательно, режим течения теплоносителей в выбранном теплообменнике – турбулентный.

Коэффициенты теплоотдачи для этанола и воды определяем из критериальной зависимости, полученной для теплоотдачи в прямых трубах и каналах при турбулентном течении теплоносителей по формуле (10).

$$Nu = 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{cm}} \right)^{0.25},$$

Коэффициент теплопроводности этанола при средней температуре ( $t_{cp}^{эм} = 52.58^\circ \text{C}$ ) в соответствии с рисунком А.3:  $\lambda_{эм} = 0.155 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Определим критерий Прандтля для этанола при средней температуре:

$$\text{Pr}_{эм} = \frac{c_{эм} \mu_{эм}}{\lambda_{эм}} = \frac{2866 \times 6.65 \times 10^{-4}}{0.155} = 12.3,$$

где  $\text{Pr}_{эм}$  - критерий Прандтля для этанола.

Аналогично рассчитываем критерий Прандтля для средней температуры воды:

$$\text{Pr}_e = \frac{c_e \mu_e}{\lambda_e} = \frac{4190 \times 0.99 \times 10^{-3}}{0.577} = 7.2,$$

где  $\text{Pr}_e$  - критерий Прандтля для воды;

$\lambda_e = 0.577 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коэффициент теплопроводности воды при средней температуре ( $t_{cp}^e = 22.5^\circ \text{C}$ ) определен по рисунку А.3.

Как было показано выше, задача определения коэффициентов теплоотдачи решается методом последовательных приближений. Для этого соотношения (10) приводят к виду:

$$\alpha = A(\text{Pr}/\text{Pr}_{cm})^{0.25}. \quad (30)$$

Для этанола коэффициент  $A_{эм}$  будет равен:

$$A_{эм} = 0.021 \text{Re}_{эм}^{0.8} \text{Pr}_{эм}^{0.43} \frac{\lambda_{эм}}{d^{эн}} = 0.021 \times 35900^{0.8} \times 12.3^{0.43} \times \frac{0.155}{0.04} = 1054 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Для воды коэффициент  $A_g$  будет равен:

$$A_g = 0.021 \text{Re}_g^{0.8} \text{Pr}_g^{0.43} \times \frac{\lambda_g}{d_{\text{кольца}}} = 0.021 \times 14400^{0.8} \times 7.2^{0.43} \times \frac{0.577}{0.02} = 3004 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$$

Далее по таблице А.5 находим термические сопротивления загрязнений  $r_{\text{загрэм}}$  и  $r_{\text{загрв}}$ , вычисляем термическое сопротивление разделяющей теплоносители стенки и по формуле (6) определяем суммарное сопротивление  $\Sigma r_{\text{см}}$ :

$$\Sigma r_{\text{см}} = r_{\text{загрэм}} + r_{\text{загрв}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{м}}} = \frac{1}{5800} + \frac{1}{2800} + \frac{4 \times 10^{-3}}{46.5} = 6.16 \times 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт},$$

где  $r_{\text{загрэм}} = \frac{1}{5800} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$  - термическое сопротивление загрязнений стенки со стороны этанола;

$r_{\text{загрв}} = \frac{1}{2800} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$  - термическое сопротивление загрязнений стенки со стороны воды;

$\delta = 4 \times 10^{-3} \text{ м}$  - толщина стенки теплообменной трубы;

$\lambda_{\text{м}} = 46.5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коэффициент теплопроводности стали.

В первом приближении температуру стенки со стороны этанола можно принять  $t_{\text{смэм}} = 38^\circ \text{С}$ , со стороны воды  $t_{\text{смв}} = 24^\circ \text{С}$ . Затем находим вязкость, теплоёмкость и теплопроводность для этанола и воды при температурах стенки.

Динамический коэффициент вязкости этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{\text{смэм}} = 38^\circ \text{С}$ ) в соответствии с номограммой на рисунке А.1 равен:  $\mu_{\text{смэм}} = 8.5 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Теплоёмкость этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{\text{смэм}} = 38^\circ \text{С}$ ) определяем по рисунку А.4:  $c_{\text{смэм}} = 2604 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Коэффициент теплопроводности этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{\text{смэм}} = 38^\circ \text{С}$ ) в соответствии с рисунком А.3 равен:  $\lambda_{\text{смэм}} = 0.160 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

$$\text{Pr}_{\text{смэм}} = \frac{c_{\text{смэм}} \mu_{\text{смэм}}}{\lambda_{\text{смэм}}} = \frac{2604 \times 8.5 \times 10^{-4}}{0.16} = 13.86,$$

где  $\text{Pr}_{\text{смэм}}$  - критерий Прандтля для этанола при температуре стенки.

Теплоёмкость воды при температуре стенки ( $t_{\text{смв}} = 24^\circ \text{С}$ ) в соответствии с рисунком А.4:  $c_{\text{смв}} = 4185 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Динамический коэффициент вязкости воды при температуре стенки ( $t_{\text{смв}} = 24^\circ \text{С}$ ) определим по номограмме на рисунке А.1:  $\mu_{\text{смв}} = 9.57 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Коэффициент теплопроводности воды при температуре стенки ( $t_{\text{смв}} = 24^\circ \text{С}$ ) в соответствии с рисунком А.3:  $\lambda_{\text{смв}} = 0.63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .



$$\text{Pr}_{cm\epsilon} = \frac{c_{cm\epsilon} \mu_{cm\epsilon}}{\lambda_{cm\epsilon}} = \frac{4185 \times 9.57 \times 10^{-4}}{0.63} = 6.35,$$

где  $\text{Pr}_{cm\epsilon}$  - критерий Прандтля для воды при температуре стенки.

По формуле (30) определяем коэффициенты теплоотдачи для этанола и воды.

$$\alpha_{эм} = A_{эм} \left( \frac{\text{Pr}_{эм}}{\text{Pr}_{cm\epsilon}} \right)^{0.25} = 1054 \times \left( \frac{12.32}{13.86} \right)^{0.25} = 1024 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $\alpha_{эм}$  - коэффициент теплоотдачи этанола,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

$$\alpha_{\epsilon} = A_{\epsilon} \left( \frac{\text{Pr}_{\epsilon}}{\text{Pr}_{cm\epsilon}} \right)^{0.25} = 3004 \times \left( \frac{7.2}{6.35} \right)^{0.25} = 3099 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $\alpha_{\epsilon}$  - коэффициент теплоотдачи воды,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Затем определяем коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{эм}} + \Sigma r_{cm} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon}}} = \frac{1}{\frac{1}{1024} + 6.16 \times 10^{-4} + \frac{1}{3099}} = 522 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Далее находим поверхностные плотности тепловых потоков:

$$q_{эм} = \alpha_{эм} (t_{cp}^{эм} - t_{cm\epsilon}) = 1024 \times (52.58 - 38) = 1.49 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q_{эм}$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к стенке,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$q_{\epsilon} = \alpha_{\epsilon} (t_{cm\epsilon} - t_{cp}^{\epsilon}) = 3099 \times (24 - 22.5) = 4.65 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q_{\epsilon}$  - поверхностная плотность теплового потока от стенки к воде,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$q = K \Delta t_{cp} = 522 \times 30.08 = 1.57 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к воде,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Определяем расхождение плотностей тепловых потоков по формуле (27):

$$\epsilon = \frac{\max(q_{эм}, q_{\epsilon}, q) - \min(q_{эм}, q_{\epsilon}, q)}{q} = \frac{4.65 \times 10^4 - 1.49 \times 10^4}{1.57 \times 10^4} = 0.65 = 65\%.$$

Расхождение тепловых потоков более 5%, поэтому необходимо выполнить расчет во втором приближении. Для этого определяем температуры стенки по уравнениям (28), (29):

$$t_{cm\ \varepsilon} = t_{cp}^{\varepsilon} - \frac{q}{\alpha_{\varepsilon}} = 22.5 + \frac{1.57 \times 10^4}{3099} = 27.56^{\circ}C .$$

$$t_{cm\ \varepsilon m} = t_{cp}^{\varepsilon m} - \frac{q}{\alpha_{\varepsilon m}} = 52.58 - \frac{1.57 \times 10^4}{1024} = 37.24^{\circ}C ,$$

Во втором приближении температура стенки со стороны этанола  $t_{cm\ \varepsilon m} = 37.24^{\circ}C$ , со стороны воды  $t_{cm\ \varepsilon} = 27.56^{\circ}C$ . Далее повторяем расчет и находим вязкость, теплоёмкость и теплопроводность для этанола и воды при новых температурах стенки.

Коэффициент динамической вязкости этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{cm\ \varepsilon m} = 37.24^{\circ}C$ ) по рисунку А.1:  $\mu_{cm\ \varepsilon m} = 8.6 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Теплоёмкость этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{cm\ \varepsilon m} = 37.24^{\circ}C$ ) по рисунку А.4:  $c_{cm\ \varepsilon m} = 2590 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Коэффициент теплопроводности этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{cm\ \varepsilon m} = 37.24^{\circ}C$ ) по рисунку А.3:  $\lambda_{cm\ \varepsilon m} = 0.16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Далее определяем критерии Прандтля при температурах стенок для этанола и воды:

$$\text{Pr}_{cm\ \varepsilon m} = \frac{c_{cm\ \varepsilon m} \mu_{cm\ \varepsilon m}}{\lambda_{cm\ \varepsilon m}} = \frac{2590 \times 8.6 \times 10^{-4}}{0.16} = 13.95 ,$$

где  $\text{Pr}_{cm\ \varepsilon m}$  - критерий Прандтля для этанола при температуре стенки.

Динамический коэффициент вязкости воды при температуре стенки ( $t_{cm\ \varepsilon} = 27.56^{\circ}C$ ) по номограмме на рисунке А.1:  $\mu_{cm\ \varepsilon} = 8.83 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Теплоёмкость воды при температуре стенки ( $t_{cm\ \varepsilon} = 27.56^{\circ}C$ ) по рисунку А.4:  $c_{cm\ \varepsilon} = 4185 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Коэффициент теплопроводности воды при температуре стенки ( $t_{cm\ \varepsilon} = 27.56^{\circ}C$ ) по рисунку А.3:  $\lambda_{cm\ \varepsilon} = 0.64 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

$$\text{Pr}_{cm\ \varepsilon} = \frac{c_{cm\ \varepsilon} \mu_{cm\ \varepsilon}}{\lambda_{cm\ \varepsilon}} = \frac{4185 \times 8.83 \times 10^{-4}}{0.64} = 5.75 ,$$

где  $\text{Pr}_{cm\ \varepsilon}$  - критерий Прандтля для воды при температуре стенки.

По формуле (30) определяем коэффициенты теплоотдачи для этанола и воды:

$$\alpha_{\varepsilon m} = A_{\varepsilon m} \left( \frac{\text{Pr}_{\varepsilon m}}{\text{Pr}_{cm\ \varepsilon m}} \right)^{0.25} = 1054 \times \left( \frac{12.32}{12.95} \right)^{0.25} = 1022 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) ,$$

где  $\alpha_{\varepsilon m}$  - коэффициент теплоотдачи этанола,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

$$\alpha_g = A_g \left( \frac{\text{Pr}_g}{\text{Pr}_{cm\ g}} \right)^{0.25} = 3004 \times \left( \frac{7.2}{5.75} \right)^{0.25} = 3177 \text{ Bm} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}),$$

где  $\alpha_g$  - коэффициент теплоотдачи воды,  $\text{Bm} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

Затем определяем коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{эм}} + \Sigma r_{cm} + \frac{1}{\alpha_g}} = \frac{1}{\frac{1}{1022} + 6.16 \times 10^{-4} + \frac{1}{3177}} = 523.88 \text{ Bm} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}),$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи,  $\text{Bm} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Далее находят поверхностные плотности тепловых потоков:

$$q_{эм} = \alpha_{эм} (t_{cp}^{эм} - t_{cm\ эм}) = 1022 \times (52.58 - 37.24) = 1.568 \times 10^4 \text{ Bm} / \text{m}^2,$$

где  $q_{эм}$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к стенке,  $\text{Bm} / \text{m}^2$ .

$$q_g = \alpha_g (t_{cm\ g} - t_{cp}^g) = 3177 \times (27.56 - 22.5) = 1.609 \times 10^4 \text{ Bm} / \text{m}^2,$$

где  $q_g$  - поверхностная плотность теплового потока от стенки к воде,  $\text{Bm} / \text{m}^2$ .

$$q = K \Delta t_{cp} = 523.88 \times 30.08 = 1.576 \times 10^4 \text{ Bm} / \text{m}^2,$$

где  $q$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к воде,  $\text{Bm} / \text{m}^2$ .

Определяем расхождение тепловых потоков:

$$\varepsilon = \frac{\max(q_{эм}, q_g, q) - \min(q_{эм}, q_g, q)}{q} = \frac{1.609 \times 10^4 - 1.568 \times 10^4}{1.576 \times 10^4} = 0.026 = 2.6\%.$$

Расхождение тепловых потоков менее 5%. Расчет коэффициента теплопередачи заканчиваем и переходим к окончательному определению площади поверхности теплообмена.

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}} = \frac{81690}{523.88 \times 30.08} = 5.18 \text{ m}^2,$$

где  $F$  - площадь поверхности теплообмена,  $\text{m}^2$ .

Определяем запас площади поверхности.

$$\frac{F_{ann} - F}{F} = \frac{6.23 - 5.18}{5.18} = 0.2 = 20\%.$$

Площадь теплообменной поверхности аппарата достаточна для охлаждения этанола, так как запас площади составляет 20%.

## 5.2 Расчет кожухотрубчатого теплообменника

### 5.2.1 Исходные данные для расчета

На складе оборудования имеется стальной одноходовый кожухотрубчатый теплообменник с перегородками в межтрубном пространстве, с площадью поверхности теплообмена  $F_{ann} = 663 \text{ м}^2$ . Диаметр теплообменных трубок  $d = 20 \times 2 \text{ мм}$ . Площади проходных сечений: трубного пространства  $S_m = 23.6 \times 10^{-2} \text{ м}^2$  и межтрубного пространства в прорезях перегородок  $S_{en} = 10.1 \times 10^{-2} \text{ м}^2$ . Достаточно ли площадь теплообменной поверхности этого аппарата для охлаждения этанола, поступающего в межтрубное пространство теплообменника, от  $t_n = 73^\circ \text{ C}$  до  $t_k = 35^\circ \text{ C}$  водой, которая подается в трубное пространство. Температура воды меняется от  $t'_e = 15^\circ \text{ C}$  до  $t''_e = 30^\circ \text{ C}$ . Расход этанола  $G = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

### 5.2.2 Пример расчета

Определяем среднюю разность температур в теплообменнике по формуле (18). Выбираем противоточное направление течения теплоносителей, при этом:

$$\begin{aligned}\Delta t_{\delta} &= 73 - 30 = 43^\circ \text{ C}, \\ \Delta t_{\text{м}} &= 35 - 15 = 20^\circ \text{ C}, \\ \Delta t_{\text{cp}} &= \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{43.2 - 20}{\ln \frac{43.2}{20}} = 30.08^\circ \text{ C},\end{aligned}$$

где  $\Delta t_{\delta}$  - большая разность температур;

$\Delta t_{\text{м}}$  - меньшая разность температур;

$\Delta t_{\text{cp}}$  - средняя разность температур.

Температура воды меняется на меньшее число градусов, следовательно, её среднюю температуру определяем как среднее арифметическое по формуле (19):

$$t_e^{\text{cp}} = \frac{t'_e + t''_e}{2} = \frac{15 + 30}{2} = 22.5^\circ \text{ C},$$

где  $t_e^{\text{cp}}$  - средняя температура воды.

Среднюю температуру этанола рассчитываем по формуле (20) как:

$$t_{\text{cp}}^{\text{э}} = \Delta t_{\text{cp}} + t_e^{\text{cp}} = 30.08 + 22.5 = 52.58^\circ \text{ C}.$$

Теплоёмкость этанола находим по номограмме на рисунке А.4 при его средней температуре ( $t_{\text{cp}}^{\text{э}} = 52.58^\circ \text{ C}$ ):  $c_{\text{эм}} = 2866 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$ .

Определяем количества тепла передаваемого в холодильнике от этанола к воде по формуле (2).

$$Q = G c_{эм} (t_n - t_k) = \frac{40 \times 10^3}{3600} \times 2866 \times (73 - 35) = 1.21 \times 10^7 \text{ Вт},$$

где  $Q$  - количество передаваемого тепла,  $Вт$ .

Массовый расход воды, необходимый для охлаждения этанола рассчитаем по формуле (3).

Теплоёмкость воды  $c_в = 4190 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  при её средней температуре ( $t_в^{cp} = 22.5^\circ \text{C}$ ) определяем по номограмме на рисунке А.4.

$$G_в = \frac{Q}{c_в (t_в^к - t_в^н)} = \frac{1.21 \times 10^7}{4190 \times (30 - 15)} = 192.5 \text{ кг/с},$$

где  $G_в$  - расход воды,  $кг/с$ .

Плотность этанола находим при его средней температуре ( $t_{cp}^{эм} = 52.58^\circ \text{C}$ ) по таблице А1:  $\rho_{эм} = 756.2 \text{ кг/м}^3$ . Плотность воды  $\rho_в = 1000 \text{ кг/м}^3$  при её средней температуре ( $t_в^{cp} = 22.5^\circ \text{C}$ ) находим по таблице А1.

Воду направляем в трубное пространство, этанол в межтрубное. Скорость воды определяем как:

$$w_в = \frac{G_в}{S_m \rho_в} = \frac{192.5}{23.6 \times 10^{-2} \times 1000} = 0.818 \text{ м/с},$$

где  $S_m = 23.6 \times 10^{-2} \text{ м}^2$  - площадь проходного сечения трубного пространства.

Скорость этанола рассчитываем аналогично:

$$w_{эм} = \frac{G_{эм}}{S_{ен} \rho_{эм}} = \frac{40 \times 10^3}{3600 \times 10.1 \times 10^{-2} \times 756.2} = 1.455 \text{ м/с},$$

где  $S_{ен} = 10.1 \times 10^{-2} \text{ м}^2$  - площадь проходного сечения межтрубного пространства в вырезе перегородки.

Для оценки режимов течения воды и этанола необходимо определить динамические коэффициенты вязкости по номограмме на рисунке А1. Динамический коэффициент вязкости этанола при его средней температуре ( $t_{cp}^{эм} = 52.58^\circ \text{C}$ ) равен  $\mu_{эм} = 6.65 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Динамический коэффициент вязкости воды при её средней температуре ( $t_в^{cp} = 22.5^\circ \text{C}$ ) равен  $\mu_в = 9.9 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Критерий Рейнольдса для воды в трубном пространстве по формуле (9):

$$\text{Re}_e = \frac{w_e \rho_e d^{6H}}{\mu_e} = \frac{0.818 \times 1000 \times 0.016}{9.9 \times 10^{-4}} = 13200,$$

где  $d^{6H} = 0.016 \text{ м}$  - определяющий геометрический размер (внутренний диаметр теплообменной трубки).

Критерий Рейнольдса для этанола в межтрубном пространстве по формуле (9):

$$\text{Re}_{эм} = \frac{w_{эм} \rho_{эм} d^H}{\mu_{эм}} = \frac{1.455 \times 756.2 \times 0.02}{6.65 \times 10^{-4}} = 33070,$$

где  $\text{Re}_{эм}$  - критерий Рейнольдса для этанола;

$d^H = 0.02 \text{ м}$  - определяющий геометрический размер (наружный диаметр теплообменной трубки).

Коэффициент теплоотдачи для воды определяем из критериальной зависимости, полученной для теплоотдачи в прямых трубах и каналах при турбулентном течении теплоносителей по формуле (10).

$$Nu = 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{cm}} \right)^{0.25},$$

Рассчитываем критерий Прандтля для средней температуре воды:

$$\text{Pr}_e = \frac{c_e \mu_e}{\lambda_e} = \frac{4190 \times 0.99 \times 10^{-3}}{0.577} = 7.2,$$

где  $\text{Pr}_e$  - критерий Прандтля для воды.

В соответствии с рисунком А3 теплопроводность воды при средней температуре ( $t_{cp}^e = 22.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) равна  $\lambda_e = 0.577 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Коэффициент теплоотдачи для этанола определяем из критериальной зависимости для теплоотдачи при поперечном обтекании пучка труб, формула (13):

$$Nu = 0.4 \varepsilon_\varphi \text{Re}^{0.65} \text{Pr}^{0.36} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{cm}} \right)^{0.25},$$

где  $\varepsilon_\varphi$  - коэффициент, учитывающий угол атаки, в данном расчете примем его равным 0.6.

В соответствии с рисунком А3 теплопроводность этанола при средней температуре ( $t_{cp}^m = 52.58 \text{ }^\circ\text{C}$ ) равна:  $\lambda_{эм} = 0.155 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Зная теплопроводность, вязкость и теплоёмкость при средней температуре, можно определить критерий Прандтля для этанола.

$$\text{Pr}_{эм} = \frac{c_{эм} \mu_{эм}}{\lambda_{эм}} = \frac{2866 \times 6.65 \times 10^{-4}}{0.155} = 12.32,$$

где  $Pr_{эм}$  - критерий Прандтля для этанола.

Как было показано выше, задача определения коэффициентов теплоотдачи решается методом последовательных приближений. Для этого соотношения (10), (13) приводят к виду:

$$\alpha = A(Pr/Pr_{cm})^{0.25}. \quad (31)$$

Для воды коэффициент  $A_в$  будет равен:

$$A_в = 0.021 Re_в^{0.8} Pr_в^{0.43} \times \frac{\lambda_в}{d^{0.4}} = 0.021 \times 13200^{0.8} \times 7.2^{0.43} \times \frac{0.577}{0.016} = 3496 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Для этанола коэффициент  $A_{эм}$  будет равен:

$$A_{эм} = 0.4 \varepsilon_\varphi Re_{эм}^{0.6} Pr_{эм}^{0.36} \frac{\lambda_{эм}}{d^0} = 0.4 \times 0.6 \times 33070^{0.6} \times 12.32^{0.36} \times \frac{0.155}{0.02} = 2362 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Далее по таблице А.5 находим термические сопротивления загрязнений  $r_{загрэм}$  и  $r_{загрв}$ , вычисляем термическое сопротивление разделяющей теплоносителя стенки и по формуле (6) определяем суммарное сопротивление  $\Sigma r_{cm}$ :

$$\Sigma r_{cm} = r_{загрэм} + r_{загрв} + \frac{\delta}{\lambda_m} = \frac{1}{5800} + \frac{1}{2800} + \frac{2 \times 10^{-3}}{46.5} = 5.73 \times 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт},$$

где  $r_{загрэм} = \frac{1}{5800} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$  - термическое сопротивление загрязнений стенки со стороны этанола;

$r_{загрв} = \frac{1}{2800} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$  - термическое сопротивление загрязнений стенки со стороны воды;

$\delta = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$  - толщина стенки теплообменной трубы;

$\lambda_m = 46.5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коэффициент теплопроводности стали.

В первом приближении температуру стенки со стороны этанола можно принять  $t_{cmэм} = 38^\circ \text{С}$ , со стороны воды  $t_{cmв} = 28^\circ \text{С}$ . Затем находим вязкость, теплоёмкость и теплопроводность для воды и этанола для выбранных температурах стенок и определяем критерии Прандтля для воды и этанола при этих температурах.

По номограмме на рисунке А.1 определяем динамический коэффициент вязкости воды при температуре стенки ( $t_{cmв} = 28^\circ \text{С}$ ):  $\mu_{cmв} = 8.55 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{С}$ .

По номограмме на рисунке А.4 находим теплоёмкость воды при температуре стенки ( $t_{cmв} = 28^\circ \text{С}$ ):  $c_{cmв} = 4185 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Теплопроводность воды при температуре стенки ( $t_{cmв} = 28^\circ \text{С}$ ) определяем из рисунка А.3:  $\lambda_{cmв} = 0.65 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

$$\text{Pr}_{cm\text{ в}} = \frac{c_{cm\text{ в}} \mu_{cm\text{ в}}}{\lambda_{cm\text{ в}}} = \frac{4185 \times 8.55 \times 10^{-4}}{0.65} = 5.53,$$

где  $\text{Pr}_{cm\text{ в}}$  - критерий Прандтля для воды при температуре стенки.

В соответствии с рисунком А.1 динамический коэффициент вязкости этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{cm\text{ эт}} = 38^\circ\text{C}$ ) равен:  $\mu_{cm\text{ эт}} = 8.5 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

По номограмме на рисунке А.4 определяем теплоёмкость этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{cm\text{ эт}} = 38^\circ\text{C}$ ):  $c_{cm\text{ эт}} = 2604 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

В соответствии с рисунком А.3 теплопроводность этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{cm\text{ эт}} = 38^\circ\text{C}$ ):  $\lambda_{cm\text{ эт}} = 0.160 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ .

$$\text{Pr}_{cm\text{ эт}} = \frac{c_{cm\text{ эт}} \mu_{cm\text{ эт}}}{\lambda_{cm\text{ эт}}} = \frac{2604 \times 8.5 \times 10^{-4}}{0.16} = 13.86,$$

где  $\text{Pr}_{cm\text{ эт}}$  - критерий Прандтля для этанола при температуре стенки.

По формуле (31) определяем коэффициенты теплоотдачи для воды и этанола.

$$\alpha_{\text{в}} = A_{\text{в}} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{в}}}{\text{Pr}_{cm\text{ в}}} \right)^{0.25} = 3496 \times \left( \frac{7.2}{5.53} \right)^{0.25} = 3734 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}),$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  - коэффициент теплоотдачи воды,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ .

$$\alpha_{\text{эт}} = A_{\text{эт}} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{эт}}}{\text{Pr}_{cm\text{ эт}}} \right)^{0.25} = 2362 \times \left( \frac{12.32}{13.86} \right)^{0.25} = 2293 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}),$$

где  $\alpha_{\text{эт}}$  - коэффициент теплоотдачи этанола,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ .

Затем определяем коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{эт}}} + \Sigma r_{cm} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} = \frac{1}{\frac{1}{2293} + 5.73 \times 10^{-4} + \frac{1}{3734}} = 783.4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}),$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ .

Далее находим поверхностные плотности тепловых потоков:

$$q_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} (t_{cm\text{ в}} - t_{cp}^{\text{в}}) = 3734 \times (28 - 22.5) = 2.43 \times 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q_{\text{в}}$  - поверхностная плотность теплового потока от стенки к воде,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$q_{\text{эт}} = \alpha_{\text{эт}} (t_{cp}^{\text{эт}} - t_{cm\text{ эт}}) = 2293 \times (52.58 - 38) = 3.34 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q_{\text{эт}}$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к стенке,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .



$$q = K\Delta t_{cp} = 783.4 \times 30.08 = 2.357 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

где  $q$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к воде,  $\text{Вт/м}^2$ .

Определяем расхождение плотностей тепловых потоков по формуле (27):

$$\varepsilon = \frac{\max(q_{эм}, q_в, q) - \min(q_{эм}, q_в, q)}{q} = \frac{3.34 \times 10^4 - 2.357 \times 10^4}{2.357 \times 10^4} = 0.42 = 42\%.$$

Расхождение тепловых потоков более 5% , поэтому необходимо выполнить расчет во втором приближении, для этого определяем температуры стенки по уравнениям (28), (29):

$$t_{ст эм} = t_{cp}^{эм} - \frac{q}{\alpha_{эм}} = 52.58 - \frac{2.357 \times 10^4}{2293} = 42.3^\circ \text{C},$$

$$t_{ст в} = t_{cp}^в + \frac{q}{\alpha_в} = 22.5 + \frac{2.357 \times 10^4}{3734} = 28.81^\circ \text{C}.$$

Во втором приближении температура стенки со стороны этанола  $t_{ст эм} = 42.3^\circ \text{C}$ , со стороны воды  $t_{ст в} = 28.81^\circ \text{C}$ . Далее повторяем расчет, находим вязкость, теплоёмкость и теплопроводность для воды и этанола при температурах стенок и определяем критерии Прандтля при этих температурах.

$\mu_{ст в} = 8.58 \times 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$  - динамический коэффициент вязкости воды при температуре стенки ( $t_{ст в} = 28.81^\circ \text{C}$ ), рисунок А.1.

$c_{ст в} = 4182 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  - теплоёмкость воды при температуре стенки ( $t_{ст в} = 28.81^\circ \text{C}$ ), рисунок А.4.

$\lambda_{ст в} = 0.65 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  - теплопроводность воды при температуре стенки ( $t_{ст в} = 28.81^\circ \text{C}$ ), рисунок А.3.

$$\text{Pr}_{ст в} = \frac{c_{ст в} \mu_{ст в}}{\lambda_{ст в}} = \frac{4182 \times 8.58 \times 10^{-4}}{0.65} = 5.56,$$

где  $\text{Pr}_{ст в}$  - критерий Прандтля для воды при температуре стенки.

$\mu_{ст эм} = 7.9 \times 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$  - коэффициент динамической вязкости этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{ст эм} = 42.3^\circ \text{C}$ ), рисунок А.1.

$c_{ст эм} = 2681 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  - теплоёмкость этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{ст эм} = 42.3^\circ \text{C}$ ), рисунок А.4.

$\lambda_{ст эм} = 0.16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  - теплопроводность этанола при температуре стенки со стороны этанола ( $t_{ст эм} = 42.3^\circ \text{C}$ ), рисунок А.3.

$$\text{Pr}_{\text{ст эт}} = \frac{c_{\text{ст эт}} \mu_{\text{ст эт}}}{\lambda_{\text{ст эт}}} = \frac{2681 \times 7.9 \times 10^{-4}}{0.16} = 13.36,$$

где  $\text{Pr}_{\text{ст эт}}$  - критерий Прандтля для этанола при температуре стенки.

По формуле (31) определяем коэффициенты теплоотдачи для воды и этанола.

$$\alpha_6 = A_6 \left( \frac{\text{Pr}_6}{\text{Pr}_{\text{ст 6}}} \right)^{0.25} = 3496 \times \left( \frac{7.2}{5.56} \right)^{0.25} = 3729 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $\alpha_6$  - коэффициент теплоотдачи воды,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

$$\alpha_{\text{эт}} = A_{\text{эт}} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{эт}}}{\text{Pr}_{\text{ст эт}}} \right)^{0.25} = 2362 \times \left( \frac{12.32}{13.36} \right)^{0.25} = 2314 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $\alpha_{\text{эт}}$  - коэффициент теплоотдачи этанола,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Затем определяем коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{эт}}} + \Sigma r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_6}} = \frac{1}{\frac{1}{2314} + 5.73 \times 10^{-4} + \frac{1}{3729}} = 785.63 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Далее находят поверхностные плотности тепловых потоков:

$$q_6 = \alpha_6 (t_{\text{ст 6}} - t_{\text{ср}}^6) = 3729 \times (28.81 - 22.5) = 2.35 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q_6$  - поверхностная плотность теплового потока от стенки к воде,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$q_{\text{эт}} = \alpha_{\text{эт}} (t_{\text{ср}}^{\text{эт}} - t_{\text{ст эт}}) = 2314 \times (52.58 - 42.3) = 2.38 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q_{\text{эт}}$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к стенке,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$q = K \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 785.63 \times 30.8 = 2.36 \times 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

где  $q$  - поверхностная плотность теплового потока от этанола к воде,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Определяем расхождение тепловых потоков:

$$\varepsilon = \frac{\max(q_{\text{эт}}, q_6, q) - \min(q_{\text{эт}}, q_6, q)}{q} = \frac{2.38 \times 10^4 - 2.35 \times 10^4}{2.36 \times 10^4} = 0.012 = 1.2\%$$

Расхождение тепловых потоков менее 5%. Расчет коэффициента теплопередачи заканчиваем и переходим к окончательному определению требуемой площади поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}} = \frac{1.21 \times 10^7}{785.63 \times 30.08} = 512 \text{ м}^2,$$

где F - площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Определяем запас площади поверхности теплообмена :

$$\frac{F_{ann} - F}{F} = \frac{663 - 512}{512} = 0.29 = 29\%$$

Площадь теплообменной поверхности аппарата достаточна для охлаждения этанола, так как запас площади составляет 29% .

### 6 Задание на курсовую работу

Выбор варианта задания производится в соответствии с первой буквой фамилии по таблице 3 или в соответствии с заданием преподавателя.

Таблица 3 - Варианты заданий курсовой работы

Буква	<b>А</b>	<b>Б</b>	<b>В</b>	<b>Г</b>	<b>Д</b>
№ варианта	1	2	3	4	5
Буква	<b>Е, Ё</b>	<b>Ж</b>	<b>З</b>	<b>И, Й</b>	<b>К</b>
№ варианта	6	7	8	9	10
Буква	<b>Л</b>	<b>М</b>	<b>Н</b>	<b>О</b>	<b>П</b>
№ варианта	11	12	13	14	15
Буква	<b>Р</b>	<b>С</b>	<b>Т</b>	<b>У</b>	<b>Ф</b>
№ варианта	16	17	18	19	20
Буква	<b>Х</b>	<b>Ц, Ю</b>	<b>Ч</b>	<b>Ш, Щ</b>	<b>Э, Я</b>
№ варианта	21	22	23	24	25

### Варианты № 1-13

На складе оборудования имеется стальной теплообменник «труба в трубе», с площадью поверхности теплообмена  $F_{ann}$ . Диаметр теплообменной трубы  $d$ , кожуховой  $D$ . Площади проходных сечений: теплообменной трубы  $S_m$  и кольцевого пространства  $S_k$ . Достаточно ли площадь теплообменной поверхности этого аппарата для охлаждения жидкости, поступающей во внутреннюю трубу теплообменника, от  $t_n$  до  $t_k$  водой, которая подается в кольцевое пространство. Температура воды меняется от  $t_g^H$  до  $t_g^K$ . Расход жидкости  $G$ . Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

Площадь теплообменной поверхности аппарата считается достаточной для проведения процесса теплообмена, если запас площади составляет от 15% до 30%.

Исходные данные для вариантов № 1-13 приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Исходные данные

№	Жидкость	$F_{ann},$ $м^2$	$d,$ $мм$	$D,$ $мм$	$S_m, м^2$	$S_k, м^2$	$t_n,$ $°C$	$t_k,$ $°C$	$t_g^H,$ $°C$	$t_g^K,$ $°C$	$G,$ $кг/с$
1	бензол	33.22	108x5	159x6	$72.4 \times 10^{-4}$	$78.1 \times 10^{-4}$	68	20	10	20	1.33
2	бензол	8.9	48x4	76x4	$12.6 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^{-4}$	70	25	15	30	0.556
3	этанол	11.6	48x4	76x4	$12.6 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^{-4}$	70	15	10	20	0.556
4	этанол	32.4	89x5	133x6	$49.0 \times 10^{-4}$	$52.8 \times 10^{-4}$	70	15	10	20	0.694
5	метанол	6.23	48x4	76x4	$12.6 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^{-4}$	58	20	10	30	0.556
6	метанол	3.8	38x4	57x4	$7.07 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-4}$	48	20	10	20	0.556
7	толуол	6.2	48x4	76x4	$12.6 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^{-4}$	98	25	10	30	0.556
8	толуол	7.6	57x5	108x5	$17.0 \times 10^{-4}$	$50 \times 10^{-4}$	98	25	10	20	0.556
9	толуол	7.63	57x5	108x5	$17.0 \times 10^{-4}$	$50 \times 10^{-4}$	78	25	15	25	0.694
10	бензол	8.72	57x5	89x5	$17 \times 10^{-4}$	$23.5 \times 10^{-4}$	68	30	10	20	1.33
11	метанол	18.0	108x5	159x6	$72.4 \times 10^{-4}$	$78.1 \times 10^{-4}$	50	25	15	20	1.056
12	этанол	7.6	38x4	76x4	$7.07 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^{-4}$	65	20	12	22	0.667
13	бензол	6.23	48x4	76x4	$12.6 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^{-4}$	68	32	10	20	1.167

## Варианты № 14-25

На складе оборудования имеется стальной одноходовой кожухотрубчатый теплообменник с перегородками в межтрубном пространстве, с площадью поверхности теплообмена  $F_{ann}$ . Диаметр теплообменных трубок  $d$ . Площади проходных сечений: трубного пространства  $S_m$  и межтрубного пространства в прорезях перегородок  $S_{en}$ . Достаточна ли площадь теплообменной поверхности этого аппарата для охлаждения жидкости, поступающей в межтрубное пространство теплообменника, от  $t_n$  до  $t_k$  водой, которая подается в трубное пространство. Температура воды меняется от  $t'_e$  до  $t''_e$ . Расход жидкости  $G$ . Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

Площадь теплообменной поверхности аппарата считается достаточной для проведения процесса теплообмена, если запас площади составляет от 15% до 30% .

Исходные данные для вариантов № 14-25 приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные

№	Жидкость	$F_{ann},$ $M^2$	$d,$ $MM$	$S_m, M^2$	$S_{en}, M^2$	$t_n,$ $^{\circ}C$	$t_k,$ $^{\circ}C$	$t'_e,$ $^{\circ}C$	$t''_e,$ $^{\circ}C$	$G, m^3/ч$
14	толуол	52	25x2	$3.8 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	70	25	15	20	30
15	этанол	641	20x2	$34.0 \times 10^{-2}$	$14.5 \times 10^{-2}$	65	25	15	25	440
16	этанол	528	25x2	$25.9 \times 10^{-2}$	$10.6 \times 10^{-2}$	68	25	12	22	220
17	метанол	329	25x2	$16.1 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-2}$	58	30	20	25	180
18	метанол	147	20x2	$7.8 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-2}$	58	30	20	25	90
19	бензол	270	20x2	$14.4 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-2}$	60	25	20	25	140
20	бензол	329	25x2	$16.1 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-2}$	66	25	20	25	70
21	толуол	219	25x2	$16.1 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-2}$	80	27	20	25	75
22	бензол	121	25x2	$8.9 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-2}$	68	25	16	20	30.1
23	этанол	81	25x2	$8.9 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-2}$	70	25	16	20	26.5
24	толуол	121	25x2	$8.9 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-2}$	80	27	15	20	52
25	толуол	98	20x2	$7.8 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-2}$	90	25	15	20	50

## 7 Литература

1. Фролов, В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В. Ф. Фролов. СПб.: Химиздат, 2003. – 608 с.
2. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): учеб. пособие для вузов / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. – 3-е изд., испр. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2009. – 496 с.
3. Банных, О.П. Расчет теплообменных аппаратов: методические указания / О.П. Банных, Е.И. Борисова, О.В. Муратов. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2014. – 56 с.

**Приложение А (обязательное). Справочные данные**

**Таблица А.1 – Плотность жидких веществ и водных растворов (в кг/м<sup>3</sup>) в зависимости от температуры**

Вещество	Температура, °С							
	-20	0	20	40	60	80	100	120
Азотная кислота, 100 %	1582	1547	1513	1478	1443	1408	1373	1338
„ „ 50 %	–	1334	1310	1287	1263	1238	1212	1186
Ацетон	835	813	791	768	746	719	693	665
Бензол	–	900	879	858	836	815	793	769
Бутиловый спирт	838	824	810	795	781	766	751	735
Вода	–	1000	998	992	983	972	958	943
Гексан	693	677	660	641	622	602	581	559
Глицерин, 50 %	–	1136	1126	1116	1106	1006	996	986
Диоксид серы (жидк.)	1484	1434	1383	1327	1264	1193	1111	1010
Дихлорэтан	1310	1282	1254	1224	1194	1163	1133	1102
Изопропиловый спирт	817	801	785	768	752	735	718	700
Кальция хлорид, 25 % раствор	1248	1239	1230	1220	1210	1200	1190	1180
Метиловый спирт	828	810	792	774	756	736	714	–
Муравьиная кислота	–	1244	1220	1195	1171	1147	1121	1096
Натр едкий, 50 % раствор	–	1540	1525	1511	1497	1483	1469	1454
„ „ 40 % „	–	1443	1430	1416	1403	1389	1375	1360
Натрия хлорид, 20 % раствор	–	1157	1148	1189	1130	1120	1110	1100
Нитробензол	–	1223	1203	1183	1163	1143	1123	1103
Пропиловый спирт	–	819	804	788	770	752	733	711
Серная кислота, 98 %	–	1857	1837	1817	1798	1779	1761	1742
Тетрахлорид углерода	1670	1633	1594	1556	1517	1471	1434	1390
Толуол	902	884	866	847	828	808	788	766
Уксусная кислота	-	1072	1048	1027	1004	981	958	922
Хлорбензол	1150	1128	1107	1085	1065	1041	1021	995
Хлороформ	1563	1526	1489	1450	1411	1380	1326	1280
Этилацетат	947	924	901	876	851	825	797	768
Этиловый спирт	823	806	789	772	754	735	716	693

**Таблица А.2 – Молярная теплоемкость газов, кДж/(кмоль·К)****(при давлении 1 кгс/см<sup>2</sup>)**

Газ	0°С	100°С	300°С	600°С
Азот, кислород, воздух, оксид углерода	29,0	29,3	30,0	31,0
Аммиак	35,3	37,9	43,2	50,1
Водород	29,1	29,3	29,7	30,4
Водяной пар	35,0	35,5	36,7	39,3
Диоксид углерода и диоксид серы	38,6	41,1	45,7	54,3
Метан	35,7	39,7	47,8	59,8
Сероводород	34,3	35,8	38,8	43,3
Хлор	36,3	36,4	36,7	37,0
Примечание - С допустимым приближением данными таблицы можно пользоваться и при давлении порядка нескольких атмосфер.				



**Таблица А.3 – Коэффициенты теплопроводности твердых материалов при 0–100 °С**

Материал	Плотность (для сыпучих материалов насыпная плотность), кг/м <sup>3</sup>	Коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К)
Асбест	600	0,151
Бетон	2 300	1,28
Винипласт	1 380	0,163
Войлок шерстяной	300	0,047
Древесина (сосна) поперек волокон	600	0,140–0,174
„ „ вдоль волокон	600	0,384
Древесные опилки	230	0,070–0,093
Кладка из обыкновенного кирпича	1 700	0,698–0,814
„ „ огнеупорного кирпича	1 840	1,05
„ „ изоляционного кирпича	600	0,116–0,209
Лед	920	2,33
Накипь, водяной камень	–	1,16–3,49
Пенопласт	30	0,047
Песок сухой	1 500	0,349–0,814
Пробковая мелочь	160	0,047
Резина пористая	2 500	0,060
Ржавчина (окалина)	–	1,16
Совелит	450	0,098
Стекло	2 500	0,698–0,814
Стеклянная вата	200	0,035–0,070
Текстолит	1 380	0,244
Торфоплиты	220	0,064
Фаолит	1 730	0,419
Шлаковая вата	250	0,076
Эмаль	2 350	0,87–1,16
Алюминий	2 700	203,5
Бронза	8 000	64,0
Латунь	8 500	93,0
Медь	8 800	384
Свинец	11 400	34,9
Сталь	7 850	46,5
„ нержавеющая	7 900	17,5
Чугун	7 500	46,5–93

**Таблица А.4 – Коэффициенты теплопроводности газов при  $p_{абс} = 1$  атм [в Вт/(м·К)]**

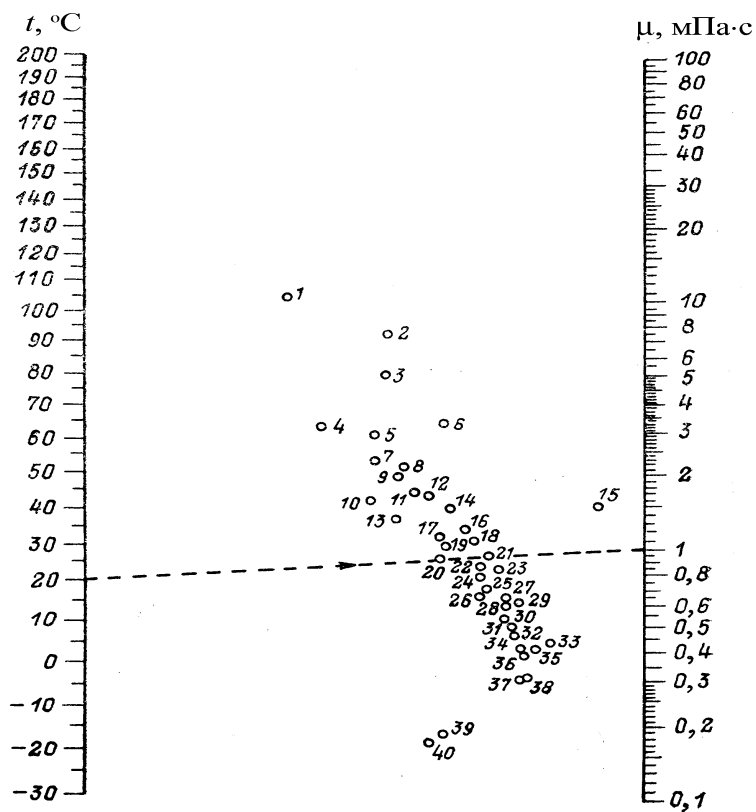
Газ	Температура, °С			
	0	50	100	200
Азот	0,0233	0,0267	0,0314	0,0384
Аммиак	0,0209	0,0256	0,0314	–
Водород	0,1628	0,1861	0,2210	0,2559
Водяной пар	0,0163	0,0198	0,0244	0,0326
Воздух	0,0244	0,0279	0,0326	0,0395
Кислород	0,0244	0,0291	0,0326	0,0407
Метан	0,0302	0,0361	0,0465	–
Углерода диоксид	0,0140	0,0186	0,0233	0,0314
Углерода оксид	0,0221	0,0244	–	–
Этан	0,0174	0,0233	0,0314	–
Этилен	0,0163	0,0209	0,0267	–

**Таблица А.5 – Среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенок**

Теплоносители	Тепловая проводимость загрязнений стенок, $1/r_{\text{загр.}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Вода загрязненная	1400–1860*
„ среднего качества	1860–2900*
„ хорошего качества	2900–5800*
„ очищенная	2900–5800*
„ дистиллированная	11600
Нефтепродукты чистые, масла, пары хладагентов	2900
Нефтепродукты сырые	1160
Органические жидкости, рассолы, жидкие хладагенты	5800
Водяной пар (с содержанием масла)	5800
Органические пары	11600
Воздух	2800
Примечание - Для воды меньшие значения тепловой проводимости загрязнений соответствуют более высоким температурам.	

**Таблица А.6 – Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления**

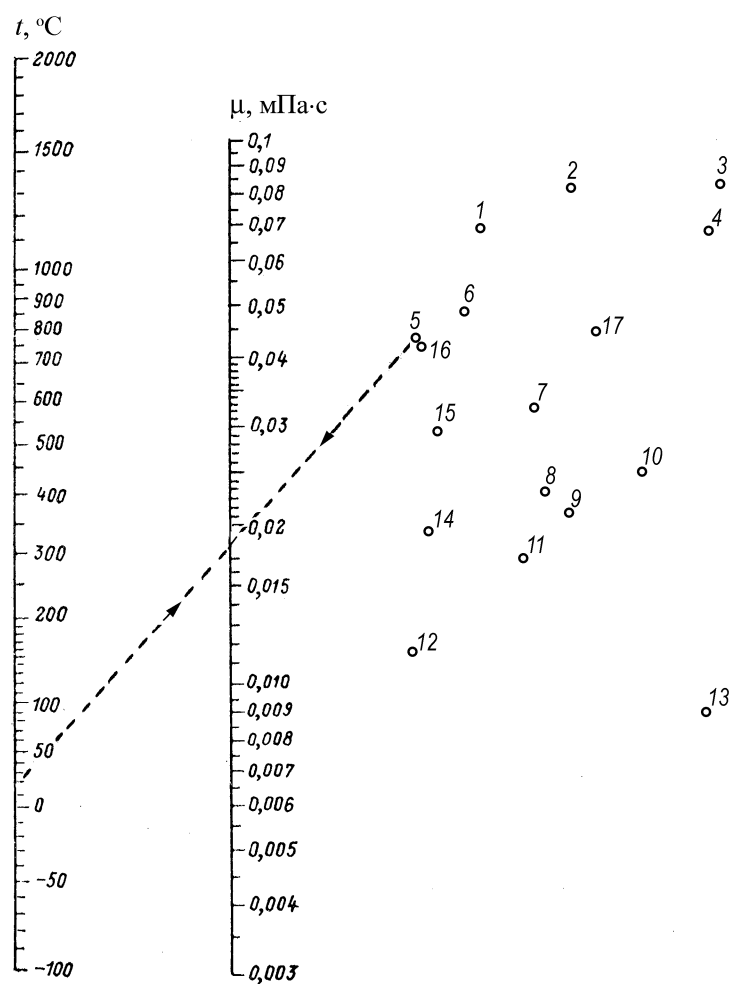
Давление (абсолютное), кгс/см <sup>2</sup>	Температура, °С	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия жидкости $i'$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара $i''$ , кДж/кг	Удельная теплота па- рообразова- ния $r = i'' - i'$ , кДж/кг
0,01	6,6	131,60	0,00760	27,7	2506	2478
0,02	17,1	68,27	0,01465	71,6	2526	2455
0,03	23,7	46,53	0,02149	99,3	2539	2440
0,04	28,6	35,46	0,02820	119,8	2548	2429
0,05	32,5	28,73	0,03481	136,2	2556	2420
0,06	35,8	24,19	0,04133	150,0	2562	2413
0,08	41,1	18,45	0,05420	172,2	2573	2400
0,10	45,4	14,96	0,06686	190,2	2581	2390
0,12	49,0	12,60	0,07937	205,3	2588	2382
0,15	53,6	10,22	0,09789	224,6	2596	2372
0,20	59,7	7,977	0,1283	250,1	2607	2358
0,30	68,7	5,331	0,1876	287,9	2620	2336
0,40	75,4	4,072	0,2456	315,9	2632	2320
0,50	80,9	3,304	0,3027	339,0	2642	2307
0,60	85,5	2,785	0,3590	358,2	2650	2296
0,70	89,3	2,411	0,4147	375,0	2657	2286
0,80	93,0	2,128	0,4699	389,7	2663	2278
0,90	96,2	1,906	0,5246	403,1	2668	2270
1,0	99,1	1,727	0,5790	415,2	2677	2264
1,2	104,2	1,457	0,6865	437,0	2686	2249
1,4	108,7	1,261	0,7931	456,3	2693	2237
1,6	112,7	1,113	0,898	473,1	2703	2227
1,8	116,3	0,997	1,003	483,6	2709	2217
2,0	119,6	0,903	1,107	502,4	2710	2208
3,0	132,9	0,6180	1,618	558,9	2730	2171
4,0	142,9	0,4718	2,120	601,1	2744	2141
5,0	151,1	0,3825	2,614	637,7	2754	2117
6,0	158,1	0,3222	3,104	667,9	2768	2095
7,0	164,2	0,2785	3,591	694,3	2769	2075
8,0	169,6	0,2454	4,075	718,4	2776	2057
9,0	174,5	0,2195	4,536	740,0	2780	2040
10	179,0	0,1985	4,037	759,6	2784	2024
11	183,2	0,1813	5,516	778,1	2787	2009
12	187,1	0,1668	5,996	795,3	2790	1995
13	190,7	0,1545	6,474	811,2	2793	1984
14	194,1	0,1438	6,952	826,7	2795	1968



**Рисунок А.1 - Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости жидкостей при различных температурах**

Таблица А. 7

Жидкость	№ точки	Жидкость	№ точки
Ацетон	34	Метилловый спирт	26
Бензол	25	Толуол	27
Бутиловый спирт	11	Углерода тетрахлорид	21
Вода	20	Укусная кислота	18
Глицерин	1	Этиловый спирт	19



1 –  $\text{O}_2$ ; 2 – NO; 3 –  $\text{CO}_2$ ; 4 – HCl; 5 – воздух; 6 –  $\text{N}_2$ ; 7 –  $\text{SO}_2$ ; 8 –  $\text{CH}_4$ ; 9 –  $\text{H}_2\text{O}$ ; 10 –  $\text{NH}_3$ ;  
 11 –  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 12 –  $\text{H}_2$ ; 13 –  $\text{C}_6\text{H}_6$ ; 14 –  $9\text{H}_2 + \text{N}_2$ ; 15 –  $3\text{H}_2 + \text{N}_2$ ; 16 – CO; 17 –  $\text{Cl}_2$ .

**Рисунок А.2 - Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости газов при  $p = 1$  атм**

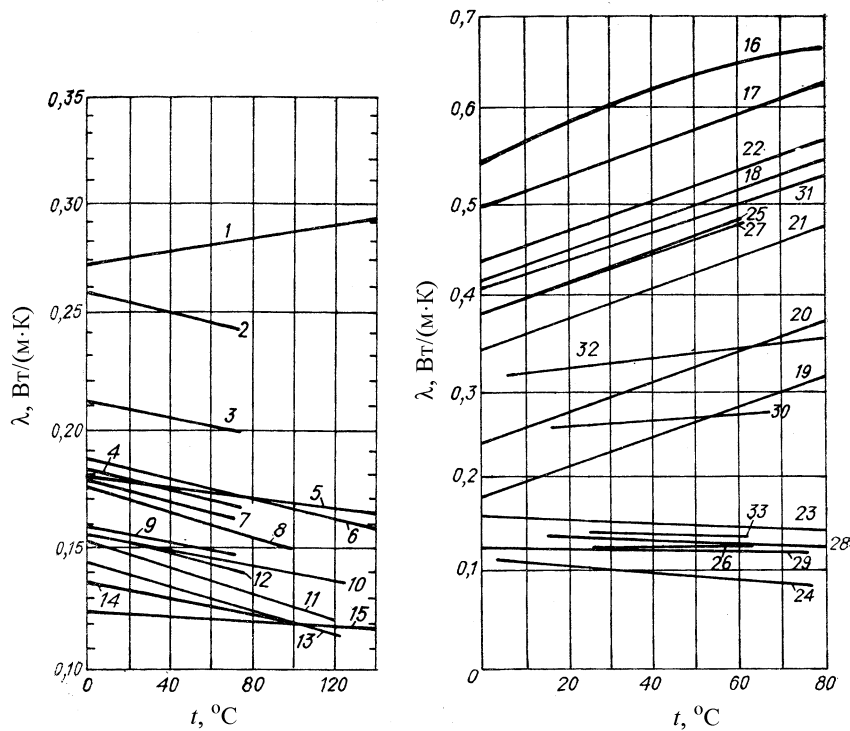
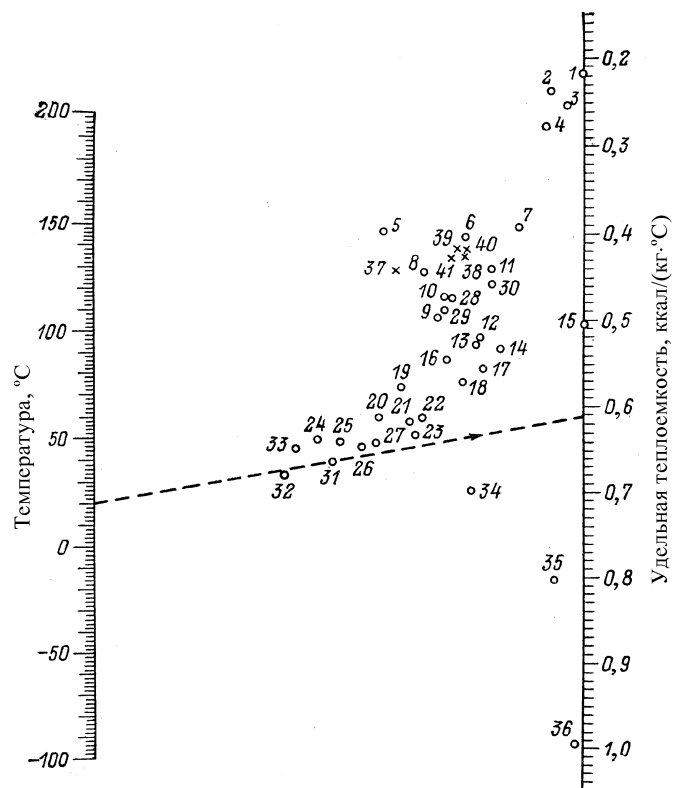


Рисунок А.3 – Коэффициенты теплопроводности жидкостей

Таблица А. 8

Вещество	№ кривой	Вещество	№ кривой
Ацетон	8	Тетрахлорид углерода	24
Бензол	11	Толуол	13
Бутиловый спирт	9	Уксусная кислота	7
Вода	16	Изопропиловый спирт	12
Метилловый спирт	3	Этиловый спирт	4

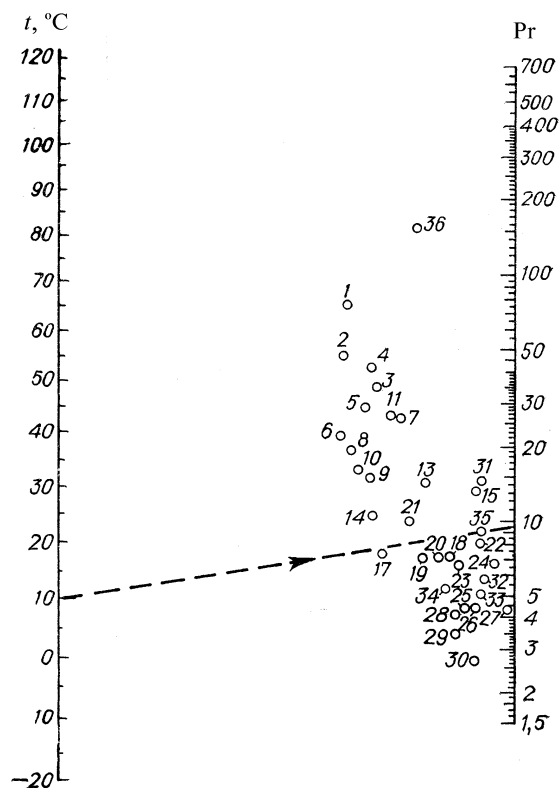


**Рисунок А.4 - Номограмма для определения удельной теплоемкости жидкостей**

Таблица А. 9

Вещество	№ точки	Вещество	№ точки
Ацетон	18	Сероуглерод	4
Бензол	29	Соляная кислота, 30 %	26
Бутиловый спирт	24	Тетрахлорид углерода	2
Вода	36	Толуол	28
Метиловый спирт	23	Хлорид натрия, 25 %	35
Пропиловый спирт	25	Этиловый спирт	31
Примечание - Пересчет в СИ: $1 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}) = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$			





**Рисунок А.5 - Номограмма для определения критерия  $Pr$  для жидкостей**

Таблица А.10

Вещество	№ точки	Вещество	№ точки
Ацетон	25	Метилловый спирт	20
Бензол	22	Тетрахлорид углерода	18
Бутиловый спирт	11	Толуол	23
Вода	17	Уксусная кислота	15
Изопропиловый спирт	7	Этиловый спирт	13

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

### **КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Кафедра химии входила в состав первых 14 кафедр ЛИТМО, сформированных в 1930 году. В 1930–1960 годах кафедра работала в рамках факультета Точной механики; в период деятельности Инженерно-физического факультета (ИФФ) с 1946 года по 1954 год кафедра входила в состав ИФФ. С 1933 года – кафедру возглавлял известный специалист в области оптического стекла профессор В.Г. Воано, позже – известный русский ученый-химик профессор С.А. Щукарев. С 1954 по 1972 год кафедру возглавлял доцент Г.С. Кошурников.

С момента второго рождения инженерно-физического факультета в 1976 г. кафедра химии вошла в его состав. В это время на кафедре стали развиваться, в основном, три научно-технологических направления: создание новых композиционных оптических материалов; разработка химических сенсоров; технология оптического волокна.

В последующие годы сотрудники кафедры, прежде всего, профессора Новиков А.Ф. и Успенская М.В., существенно переработали методику преподавания курса химии, адаптировав ее к активно внедрявшейся тогда в Университете системе дистанционного обучения. В результате преподавание курса химии в Университете ИТМО вышло на новый, более высокий уровень.

В дальнейшем на кафедре под руководством профессора М.В. Успенской активно развивалось научно-техническое направление в области химии и физики сорбирующих полимерных материалов и нанокompозитов. В частности, на основе акриловых супервлагоабсорбентов разработан ряд новых материалов многофункционального назначения: сенсоры, жидкие линзы, раневые повязки, искусственные почвы для сельского хозяйства, огнестойкие конструкционные элементы и др.

В связи с этим в 2011 году данная кафедра (исторически – кафедра химии) позиционировала себя как отдельное структурное подразделение Национального исследовательского университета ИТМО в качестве кафедры “Информационных технологий топливно-энергетического комплекса”.

С переходом отечественных предприятий на международные стандарты продукции, повышением требований к охране окружающей среды и внедрением сложных аналитических автоматизированных систем контроля качества и

мониторинга, с 2008 года в рамках направления «Техническая физика» кафедра проводит подготовку магистров и бакалавров по профилю «Физико-технические аспекты аналитического приборостроения».

Подготовка включает в себя следующие разделы:

- Компьютерные комплексы для автоматизированного контроля физических, химических, механических, термических, реологических и некоторых других свойств нефтяного сырья и продуктов нефтепереработки;
- Встроенные микропроцессорные комплексы для управления технологическими процессами и измерением широкого круга параметров энергетических установок и систем энергоснабжения;
- Физико-математическое моделирование технологических процессов нефтепереработки и топливно-энергетического комплекса;
- Информационно-аналитические системы и комплексы различного профиля, адаптированные под специфические условия работы на предприятиях ТЭК.

Уникальная программа обучения сочетает фундаментальную подготовку в области информационных систем, физической оптики, молекулярной спектроскопии, аналитической и физической химии, компьютерной метрологии, общехимической технологии и автоматики.

В рамках специальных дисциплин изучаются приборы и методы контроля качества продукции и принципы построения автоматизированных аналитических систем для предприятий ТЭК, нефтяной и химической промышленности.

Такие системы как основа информационных технологий контроля качества и мониторинга безопасности могут успешно применяться практически на всех предприятиях и лабораториях химического и нефтехимического профиля, а также в металлургической, пищевой и фармацевтической промышленности.

Выпускники кафедры имеют широкие перспективы трудоустройства в современных крупных компаниях ТЭК, таких как Роснефть, ПТК, Газпром, Киришинефтеоргсинтез, Лукойл, ТНК-ВР, а также на предприятиях и лабораториях пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности.

Практика эксплуатации предприятий ТЭК подтверждает необходимость создания и применения эффективных систем контроля за безопасностью и систем экологического мониторинга.

В связи с этим с 2011 года были разработаны и открыты бакалаврская и магистерская программы по направлению подготовки 241000 " Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии ". Основной целью образовательной магистерской программы "Информационные ресурсосберегающие технологии и экологические аспекты на предприятиях ТЭК" является подготовка высококвалифицированных специалистов, соответствующих современным требованиям к выпускникам вуза, с учетом потребностей рынка труда Санкт-Петербурга и регионов России. Будущие магистры будут способны использовать информационные технологии и

математическое моделирование для описания различных физических и физико-химических процессов, для контроля качества продукции нефтепереработки, работать на современном оборудовании в научных, научно-производственных и производственных лабораториях по исследованию выпускаемой продукции и т.д.

Основными направлениями научной деятельности в рамках магистерской программы являются:

- Создание приборов и датчиков физических величин и физико-химических параметров углеводородного сырья и продуктов (в том числе на основе нанотехнологий);
- Разработка приборов для измерения параметров качества нефтепродуктов и пищевых продуктов на основе компьютерных технологий;
- Создание эффективных информационных систем контроля качества продукции и коммерческого учета на предприятиях ТЭК на основе приборов и устройств различного назначения;
- Создание эффективных информационных систем мониторинга безопасности эксплуатации объектов ТЭК.

Подготовка магистров ведется с участием ряда промышленных предприятий, научно-производственных объединений, научно-исследовательских институтов и вузов Санкт-Петербурга, что дает возможность получить отличные знания и неоценимый опыт в различных сферах деятельности: производственной, научно-исследовательской, административной и т.д.

Биотехнология и биоинженерия являются приоритетными направлениями современной науки и промышленного производства. Продукты биотехнологии и биоинженерии востребованы в медицине, фармации, биологии, и других высокотехнологичных отраслях народного хозяйства. Разработка новых источников энергии, создание биосовместимых материалов и синтез биологически активных веществ – главные составляющие этих двух наук и отраслей производства. В частности, интенсивно развиваются производство и применение ферментов в переработке различных видов сырья и в получении биопрепаратов. Ферментные технологии имеют преимущества с экономической, технологической и экологической точек зрения, поэтому годовой оборот ферментных препаратов составляет десятки миллионов долларов США и он непрерывно растёт. По объёму производства ферментные препараты занимают третье место после аминокислот и антибиотиков. Ферментативные процессы, применяемые в технологиях, аналогичны природным, но они более безопасны и для здоровья человека и для окружающей среды.

Развитие этих отраслей сдерживается недостатком специалистов высшего уровня, подготовленных в области информационного обеспечения и средств измерения живых систем и биологических структур.

Для решения проблемы подготовки магистров на стыке информационных технологий, биологии и инженерии объединены усилия двух кафедр: Кафедра химии и молекулярной биологии ИХиБТ и кафедра ИТТЭК, имеющих опыт

подготовки специалистов бакалавров и магистров в информационных технологиях и биотехнологии.

В учебный план предлагаемой программы включены, наряду с общеобразовательными, дисциплины по информационной, биологической, химической, технологической подготовке и ряду других отраслей знаний, необходимых в подготовке специалистов заявленного уровня.

В настоящее время на каф. ИТТЭК под руководством проф. Успенской М.В., ведутся работы по направлениям, связанных с созданием материалов для фармакологии и регенеративной медицины, предметов санитарно-гигиенического назначения, а также биосовместимых и биodeградируемых материалов.

Также на кафедре под руководством проф. Неелова И.М. активно развивается моделирование полимеров и биополимеров, начиная от структуры веществ и физико-химических процессов, протекающих в живых организмах до физико-механических и эксплуатационных характеристик материалов и биосистем.

Профессорско-преподавательский состав на кафедре насчитывает 18 человек, из них 6 профессоров и докторов наук.

В настоящее время на базе кафедр НИУ ИТМО создан Международный научно-исследовательский институт биоинженерии, возглавляемый проф. М.В. Успенской, что значительно расширяет экспериментальную базу и научный потенциал кафедр и способствует повышению уровня подготовки кадров высшей категории.

В настоящее время на кафедре трудятся 18 преподавателей, шестеро из них являются докторами наук, профессорами, признанными на международном уровне, членами ученых советов в России и за рубежом.

Банная Ольга Петровна  
Борисова Екатерина Игоревна

**Курсовая работа. Расчет необходимой площади поверхности  
теплообмена**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49