

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»

Кафедра «Нанотехнологии и биотехнологии»

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ Часть 1**

Лабораторный практикум

«Испытание центробежного насоса», «Испытание лабораторного вакуум-фильтра», «Испытание циклона», «Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»» для студентов всех форм обучения специальностей 210100.62 – электроника и микроэлектроника, 240100.62 – химическая технология, 280700.62 – техносферная безопасность

Нижний Новгород 2012

Составители: В.С.Епифанова, В.М.Воротынцев, П.Н.Дроздов

УДК 66.0

Процессы и аппараты химической технологии: метод. указ. к лабораторным работам «Испытание центробежного насоса», «Испытание лабораторного вакуум-фильтра», «Испытание циклона», «Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»» для студентов всех форм обучения специальностей 210100.62 – электроника и микроэлектроника, 240100.62 – химическая технология, 280700.62 – техносферная безопасность/ НГТУ; сост.: В.М. Воротынцев, В.С. Епифанова, П.Н. Дроздов. Н. Новгород, 2012. 19 с.

Кратко изложена теория по 4 лабораторным работам: «Испытание центробежного насоса», «Испытание лабораторного вакуум-фильтра», «Испытание циклона», «Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»». Представлены схемы лабораторных установок, дано описание работ и порядок их выполнения. В конце каждой работы перечислены контрольные вопросы и приведена рекомендуемая литература.

Редактор Э.В. Абросимова

Научный редактор В.М. Воротынцев

Подп. к печ. 10.10.2012. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печ.л. 1 .  
Уч.-изд.-л. 0,5 Тираж 200 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ. 603950, Н.Новгород, ул. Минина 24.

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева. 2012

## Лабораторная работа №1

### Испытание центробежного насоса

Цель работы: Практическое ознакомление с насосной установкой и снятие ее характеристик при данном числе оборотов (зависимости напора  $-H$ ; мощности, потребляемой электродвигателем  $-N$  и КПД  $-\eta$  от производительности  $Q$ ).

Центробежные насосы нашли широкое применение для перекачивания жидкостей (в том числе и агрессивных). Принцип действия центробежного насоса состоит в том, что энергия, сообщаемая электродвигателем, приводящим во вращение рабочее колесо насоса, под действием центробежной силы преобразуется в энергию давления (напор) жидкостного потока.

Производительность и напор в центробежном насосе взаимосвязаны. С изменением производительности (при неизменном числе оборотов) изменяется и напор. Кривая, выражающая зависимость напора от производительности, носит название характеристики насоса. Характеристика насоса определяется опытным путем и необходима при подборе насоса, отвечающего требуемым условиям.

#### Описание установки

Установка состоит из бака  $1$  (рис. 1), из которого вода поступает (по всасывающему трубопроводу) в центробежный насос  $3$ . Из насоса вода по нагнетательному трубопроводу подается снова в бак  $1$ . Для регулирования количества воды, перекачиваемой насосом, на напорном трубопроводе установлен вентиль  $4$ . Замер производительности насоса производится при помощи счетчика  $2$ , установленного на напорном трубопроводе, и секундомера. Измерение напора производится при помощи манометра  $5$ , установленного на трубопроводе после насоса. Мощность, потребляемая электродвигателем насосной установки, измеряется мостом переменного тока

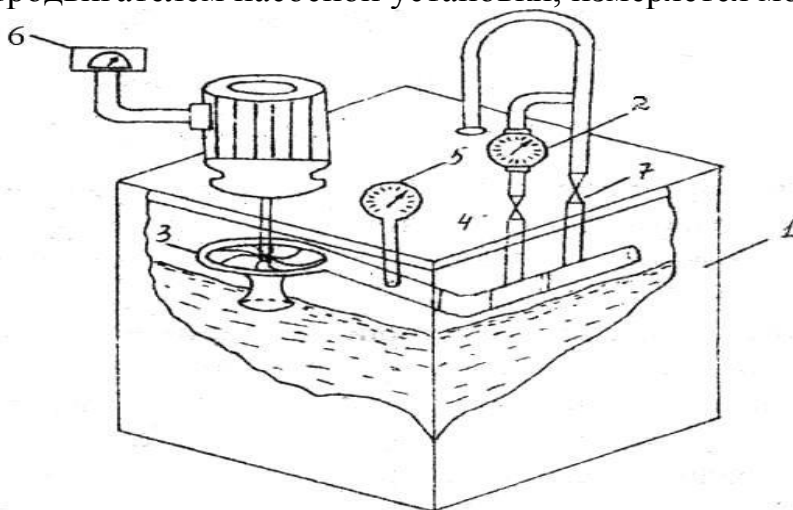


Рис. 1. Схема установки испытания центробежного насоса:  $1$  - бак;  $2$  - расходомер;  $3$  - насос;  $4,7$  - вентили;  $5$  - манометр;  $6$  - ваттметр

б. Измерение действительной затрачиваемой мощности (1-й фазы) производится с помощью измерительного комплекта (ИК), в состав которого входит ваттметр, присоединенный к электрическому двигателю насоса. На ИК имеется табличка, по которой определяется цена одного малого деления ваттметра. Цена деления указана цифрой в делении, соответствующем диапазону измеряемого напряжения (вертикаль) и силы тока (горизонталь). Измеряемое по стрелке ваттметра число деления умножается на цену деления, получается мощность (затрачиваемая насосом на одной фазе) с учетом всех КПД, составляющих суммарный КПД.

#### Методика проведения работы

Убедившись, что бак заполнен водой, подготавливают насос к пуску. Для этого открывают вентиль 7 на всасывающем трубопроводе и закрывают вентиль 4 на нагнетательном. После этого пускают двигатель насоса нажатием кнопки «пуск» магнитного пускателя и включают ваттметр. Пуск центробежного насоса производится всегда при закрытом вентиле на нагнетательной линии, так как при работе насоса с нулевой производительностью расходуется наименьшее количество энергии и, следовательно, не происходит перегрузки электромотора в момент пуска.

Записывают в журнал наблюдений показания манометра при нулевой производительности насоса. Затем вентиль 4 слегка приоткрывают, производят замер производительности. По секундомеру определяют время (в секундах), за которое большая стрелка расходомера сделает 0.1 оборота (полный оборот стрелки соответствует расходу  $0.1 \text{ м}^3$ ). Время 0.1 оборота стрелки расходомера, а также показания манометра и ваттметра записывают в журнал наблюдений. Еще больше открывают вентиль 4 и снова производят замеры производительности, напора и мощности. В результате получают ряд данных связывающих между собой напор, производительность и потребляемую мощность. Необходимо иметь в виду, что стрелка манометра при работе насоса слегка колеблется. За показание следует принимать среднее значение из их крайних положений. При малых расходах напор слегка возрастает с ростом расхода, а затем начинает падать. На испытуемом насосе участок повышения напора очень мал. Чтобы его обнаружить, необходимо первоначально вентиль 4 приоткрыть на очень малую величину.

#### Техника безопасности

Рабочее колесо насоса приводится во вращение электродвигателем, снабженным магнитным пускателем. Кожух двигателя заземлен и опасности не представляет, но рабочие органы находятся под напряжением. Поэтому в случае каких - либо неполадок в работе, студентам запрещается пытаться устранять их самостоятельно. Запрещается также касаться вращающихся деталей двигателя и насоса.

## Обработка опытных данных

Для расчета производительности по данным замеров расход 0.1 оборота стрелки расходомера ( $0.01\text{м}^3$ ) делят на время движения стрелки в секундах ( $\tau$ ), получая таким образом секундную производительность насоса:

$$Q_c = 0.01/\tau, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1.1)$$

Часовую производительность получают умножением секундной производительности на 3600:

$$Q_{\text{ч}} = 3600 Q_c, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (1.2)$$

Полный напор насоса  $H$  определяется по формуле

$$H = H_{\text{н}} + H_{\text{вс}} + \Delta h + (W_{\text{н}}^2 - W_{\text{вс}}^2)/2g, \quad (1.3)$$

где  $H_{\text{н}}$  - напор на нагнетательной линии, м;

$H_{\text{вс}}$  - разрежение на всасывающей линии, м;

$\Delta h$  - разность уровней присоединения манометра и вакуумметра, м;

$W_{\text{н}}$  - скорость жидкости в напорном трубопроводе, м/с;

$W_{\text{вс}}$  - скорость жидкости на всасывающем трубопроводе, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Величину  $\Delta h$  в нашем случае можно считать равной нулю, так как точки присоединения манометра и вакуумметра близки по вертикали. Таким образом, для данного случая полный напор насоса подсчитывается по упрощенной формуле

$$H = H_{\text{н}} + H_{\text{вс}} + (W_{\text{н}}^2 - W_{\text{вс}}^2)/2g. \quad (1.4)$$

Манометр показывают избыточное давление в кг/см<sup>2</sup>. Эти показания следует пересчитать в Паскалях, а затем величины напоров определить по формуле:

$$H = P/\rho g, \quad (1.5)$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  - плотность воды;

$g = 9.81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

Скорость в нагнетательном и всасывающем трубопроводах подсчитывается по формулам:

$$W_{\text{н}} = Q : 0.785 d_{\text{н}}^2, \quad (1.6)$$

$$W_{\text{вс}} = Q : 0.785 d_{\text{вс}}^2, \quad (1.7)$$

где  $d_{\text{н}}$  и  $d_{\text{вс}}$  — внутренние диаметры нагнетательного и всасывающего трубопроводов. В данной установке  $d_{\text{н}} = d_{\text{вс}} = 0.054 \text{ м}$  и поэтому  $W_{\text{н}} = W_{\text{вс}}$  и рассчитывать их не следует. Тогда  $H = H_{\text{н}} + H_{\text{вс}}$ . Число оборотов в нашем случае  $n = 2890 \text{ об/мин}$ . Ваттметр показывает мощность, потребляемую в цепи одной из фаз электродвигателя. Поэтому для определения полной мощности его показания нужно умножить на 3:

$$N = 3N_1. \quad (1.8)$$

Общий коэффициент полезного действия насосной установки можно определить из следующего соотношения:

$$N = \rho g Q H / \eta, \quad (1.9)$$

где  $Q$  — производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;

$H$  — напор, м;

$N$  - мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;

$\eta$  - КПД насосной установки.

Отсюда

$$\eta = \rho g Q H / N. \quad (1.10)$$

Работу заканчивают построением графиков зависимости напора  $H$  и мощности  $N$ , а также КПД от часовой производительности  $Q$ . Экспериментальные результаты проводимых исследований сводят в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные характеристики центробежного насоса

Продолжительность оборота стрелки, с	Производительность		Показания манометра кг/см <sup>2</sup>	Полезная мощность кВт	Напор		Полный КПД насоса	$N_1$ , кВт	$N$ , кВт
	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup> /ч			м	м			

### Список рекомендуемой литературы

Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов /А.Г. Касаткин. М.: Альянс, 2008. 750 с.

### Контрольные вопросы

1. Почему напор центробежного насоса зависит от производительности, а поршневого - нет?
2. Каковы достоинства и недостатки центробежного насоса?
3. Какие другие конструкции насосов Вы знаете? Укажите их достоинства, недостатки и принцип действия.
4. Какую конструкцию насоса Вы бы выбрали:
  - а) для агрессивной среды;
  - б) для жидкости, имеющей твердые включения;
  - в) для поднятия жидкости на большую высоту;
  - г) для вязких сред?
5. От каких факторов зависит высота всасывания?

### Лабораторная работа №2

#### Испытание лабораторного вакуум-фильтра

Цель работы. Ознакомление с вакуум-фильтрационной установкой и определение постоянных в уравнении  $r_{oc}$ ,  $R_{ф.п}$  и  $x_{oc}$ .

Фильтрацией называется процесс разделения неоднородных систем (жидкость — твердое тело) при помощи пористых перегородок, задерживающих твердые частицы, но пропускающих жидкость или газ. Движущей силой процесса фильтрации является перепад давлений по обе стороны фильтровальной перегородки. При фильтрации суспензии (жидкость - твердое тело) происходит ее разделение на чистую жидкость (фильтрат) и влажный осадок. Аппарат, в котором осуществляется фильтрация, называется фильтром.

Скорость процесса фильтрования суспензии описывается следующим эмпирическим уравнением:

$$W = dv/sd\tau = \Delta P / \mu (R_{oc} + R_{ф.п}), \quad (2.1)$$

где  $W$  - скорость фильтрации, т.е. объем полученного фильтрата в единицу времени с единицы площади фильтрующей перегородки,  $m^3/m^2 \cdot c$ ;

$v$  - объем фильтрата,  $m^3$ ;

$\tau$  - время фильтрации,  $c$ ;

$s$  - площадь фильтрующей перегородки,  $m^2$ ;

$\Delta P$  - перепад давлений,  $Pa$ ;

$\mu$  - вязкость фильтрата,  $Pa \cdot c$ ;

$R_{oc}$  - сопротивление слоя осадка,  $1/m$ ;

$R_{ф.п}$  - сопротивление фильтровальной перегородки,  $1/m$ .

Сопротивление слоя осадка

$$R_{oc} = r_{oc} h_{oc}, \quad (2.2)$$

где  $r_{oc}$  - удельное объемное сопротивление слоя осадка, т. е. сопротивление на 1 м толщины осадка,  $1/m^2$ ;

$h_{oc}$  - толщина слоя осадка,  $m$ .

Толщина слоя осадка меняется в процессе фильтрации. Ее можно выразить через объем полученного фильтрата -  $v$  и объем осадка, получаемого в расчете на 1  $m^3$  фильтрата -  $x_{oc}$ , следующим образом:

$$h_{oc} = v x_{oc} / s. \quad (2.3)$$

Выражая  $s$  в уравнении (2.1) через  $r_{oc}$  и  $h_{oc}$ , получим:

$$dv/sd\tau = \Delta P / \mu (r_{oc} v x_{oc} / s + R_{ф.п}). \quad (2.4)$$

Если фильтрация проводится при постоянном перепаде давлений  $\Delta P$ , то в уравнении (2.4) остаются две переменные. Они могут быть разделены, и уравнение проинтегрировано. В результате интегрирования и некоторых преобразований получим:

$$v^2 + 2s R_{ф.п} v / r_{oc} x_{oc} = 2 \Delta P s^2 \tau / \mu r_{oc} x_{oc}. \quad (2.5)$$

Если обозначить удельную производительность, т.е. производительность на единицу поверхности фильтрующей перегородки, через  $q = v / s$ , то уравнение (2.5) примет вид

$$q^2 + 2 R_{ф.п} q / r_{oc} x_{oc} = 2 \Delta P \tau / \mu r_{oc} x_{oc}. \quad (2.6)$$

Уравнения (2.5) и (2.6) выражают зависимость между количеством фильтрата и временем фильтрования.

Для расчета процесса фильтрации и размеров фильтра необходимо знание величины удельного сопротивления осадка  $r_{oc}$ , сопротивления фильтровальной перегородки  $R_{ф.п}$  и отношение объема осадка к объему фильтрата -  $x_{oc}$ . Эти величины находят экспериментально.

### Описание установки

Лабораторная установка представляет собой модель вакуум-фильтра простейшей конструкции - нутч-фильтра. Она состоит из бачка 1 (рис. 2) для суспензии с мешалкой, нутч-фильтра 2 и сборника фильтрата - 4. В отличие от промышленных фильтров в лабораторной установке фильтр и сборник фильтрата объединены в одно целое. Между фланцами фильтра и сборника зажата опорная решетка и фильтровальная перегородка 3. Сборник

фильтрата, через брызгоуловитель 9, соединен с вакуум-насосом 6. Замер вакуума в сборнике производится при помощи вакуумметра 11, температура суспензии измеряется термометром 16.

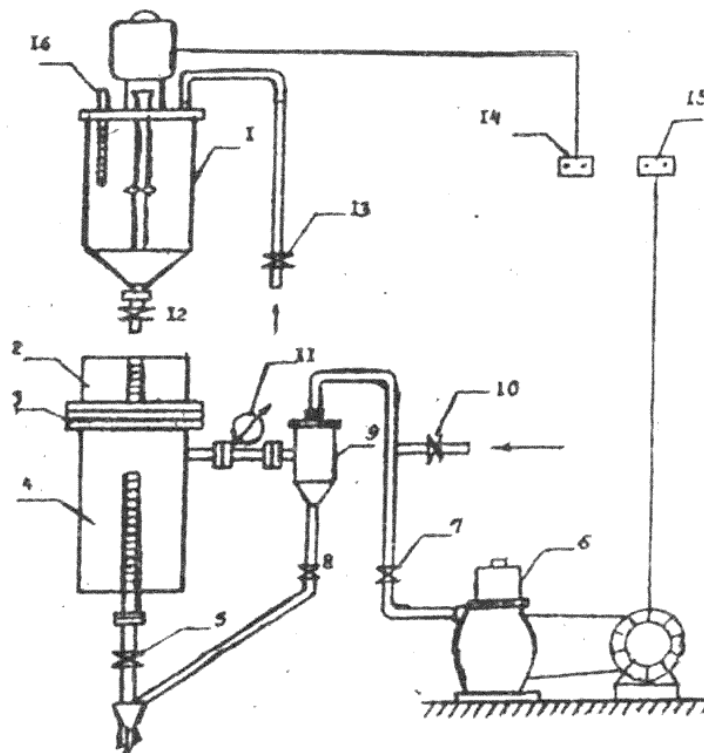


Рис. 2. Схема испытания вакуум-фильтра: 1- бачок для суспензии; 2 - нутч-фильтр; 3 - фильтрующая перегородка; 4 - сборник фильтрата; 5,7,8,10,13 - вентили; 6 - вакуум-насос; 9 - брызгоуловитель; 11 - вакуумметр; 12 - кран подачи суспензии; 14,15 - выключатели; 16 - термометр

#### Методика проведения работы

В бачок для суспензии при помощи вентиля 13 заливают воду в количестве 2-3 литров. Для определения залитой воды на стенке бачка нанесена шкала. При помощи выключателя 14 пускают в ход мешалку и через воронку на крышке бачка засыпают порошок в количестве, заданном преподавателем. Вентили 5,7 и 8 закрывают. При помощи выключателя 15 включают двигатель вакуум-насоса. Открывают кран 12 подачи суспензии на фильтр. Открывают вентиль 7 и устанавливают заданный вакуум по вакуумметру с помощью вентиля 10, поддерживая его далее постоянным в течение всего опыта. Одновременно с открыванием вентиля 7 включают секундомер. Подачу суспензии регулируют так, чтобы уровень ее над осадком поддерживался равным (100 - 150) мм, следя по шкале, нанесенной на стенке фильтра.

Наблюдают за уровнем жидкости в сборнике, также снабженном шкалой с ценой деления, равной 0.1 литра. По достижении уровнем жидкости первого деления записывают эту величину и время по секундомеру в табл. 2. Запись



повторяют, когда уровень поднимается до каждого следующего деления. В середине опыта записывают в таблицу экспериментальных данных показания термометра и вакуумметра.

Опыт заканчивают, когда вся суспензия сольется из бачка и профильтруется на фильтре. После этого выключают мешалку, закрывают вентиль 7 и выключают вакуум - насос. Открывают вентили 5 и 8 и сливают фильтрат в керамическую кружку, а затем в канализацию.

Замеряют в трех местах толщину слоя осадка линейкой и среднее значение ее записывают в журнал наблюдений. Разбирают фильтр, снимают осадок в специальный сосуд, промывают фильтр и фильтровальную перегородку и снова собирают фильтр.

Рекомендуется предварительно сделать все операции с водой, не содержащей твердую фазу.

#### Техника безопасности

Мешалка и вакуум-насос приводятся в движение электродвигателями, корпуса которых заземлены, но рабочие органы находятся под напряжением. В случае неисправностей в работе мешалки и вакуум-насоса студентам запрещается пытаться устранить их самостоятельно. Запрещается также касаться вращающихся деталей.

#### Обработка опытных данных

Уравнение (2.6) можно представить в виде зависимости  $\tau/q$  и  $q$ :

$$\tau/q = \mu r_{oc} x_{oc} q / 2\Delta P + R_{ф.п} \mu / \Delta P \quad (2.7)$$

или

$$\tau/q = k q + c. \quad (2.8)$$

Здесь величины

$$k = \mu r_{oc} x_{oc} / 2\Delta P; \quad c = R_{ф.п} \mu / \Delta P \quad (2.9)$$

являются постоянными для данного процесса и, следовательно, эта зависимость графически выражается прямой линией.

По замерам количества фильтрата  $v$ , полученного за время  $\tau$ , рассчитывают удельное количество фильтрата  $m^3/m^2$ :

$$q = v/f_{пер},$$

$f_{пер} = 0.0133 \text{ м}^2$  — площадь фильтровальной перегородки в испытуемом фильтре.

Подсчитывают величины  $\tau/q$ , соответствующие замеренным величинам  $\tau$ . Результаты подсчетов  $q$  и  $\tau/q$  заносят в табл. 2.

В прямоугольных координатах строят график зависимости  $\tau/q$  от  $q$  путем нанесения отдельных точек, выражающих эти зависимости и проведения через них прямой линии (рис. 3).

Следует иметь в виду, что первые точки обычно ложатся ниже прямой, так как пока не накопился слой осадка, скорость фильтрования несколько выше. Поэтому при проведении прямой начальные точки учитывать не следует.

По графику (с учетом масштаба осей координат) определяют величину  $k = \operatorname{tg} \alpha$  - тангенс угла наклона прямой и величину  $c$ , равную отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат

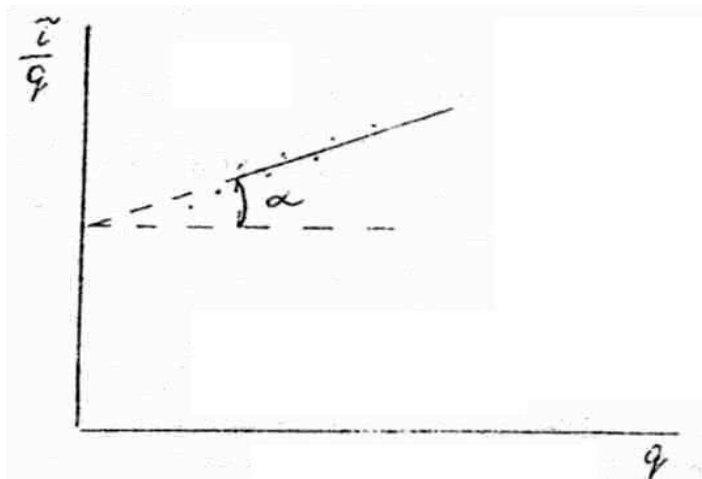


Рис. 3. Зависимость  $\tau/q$  от  $q$ .

По замеренной высоте осадка  $h_{oc}$  в метрах определяют по уравнению

$$x_{oc} = h_{oc} f_{пер} / v_k, \quad (2.10)$$

где  $v_k$  - конечный объем фильтра,  $m^3$ .

Пересчитывают замеренную величину вакуума  $\Delta P$ . По замеренной температуре из справочника находят вязкость жидкости  $\mu$ . После этого рассчитывают значения  $r_{oc}$  и  $R_{ф.п}$  по формулам:

$$R_{ф.п} = c \Delta P / \mu, \quad (2.11)$$

$$r_{oc} = 2k \Delta P / \mu x_{oc}. \quad (2.12)$$

В отчете должны быть представлены: схемы установки с описанием, журнал наблюдений и обработки, график зависимости  $\tau/q$  и  $q$  и расчет величин  $x_{oc}$ ,  $R_{ф.п}$ , и  $r_{oc}$ .

Таблица 2. Экспериментальные результаты процесса фильтрования и результаты обработки опытных данных

Вакуум = ..... кг/см <sup>2</sup>	$\Delta P$ = ..... Па	Температура = .... °С	Вязкость $\mu$ = ..... Па с	Высота осадка $h_{oc}$ = .... м
Время $\tau$ , с		Объем фильтрата $v$ , л	Удельное количество фильтрата $q$ , м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	$\tau/q$

#### Список рекомендуемой литературы

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. 14-е изд. /А.Г. Касаткин. М.: Альянс, 2008. 750 с.

2. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. М.: Альянс, 2007. 576 с.

### Контрольные вопросы

1. Как в реальных условиях можно осуществить фильтрацию при  $\Delta P = \text{const}$  или  $W = \text{const}$ ?
2. Возможно ли экспериментально определить удельное сопротивление сжимаемых осадков фильтрацией при  $W = \text{const}$ ? Ответ подтвердить соответствующими уравнениями.
3. В каких условиях лучше фильтровать сжимаемые осадки: под давлением или под вакуумом?
4. Классификация фильтров.
5. Описать конструкцию различных фильтров (нутч-фильтры, фильтр-прессы, листовые, патронные и ленточные фильтры, барабанные и карусельные фильтры).
6. Когда используются фильтрующие центрифуги? Описать их конструкцию.

### Лабораторная работа № 3

#### Испытание циклона

Цель работы. Ознакомление с принципом действия циклона и определение коэффициента полезного действия и коэффициента сопротивления.

Циклоны применяются для удаления твердых частиц с целью очистки технологических или выхлопных газов от загрязнения или улавливания ценных продуктов. Принцип действия циклона заключается в том, что запыленный газ, поступающий в корпус циклона по касательной, получает вращательное движение. Под воздействием центробежной силы твердые частицы отбрасываются к стенкам и, опускаясь с потоком газа вниз, выводятся через отверстие в нижней части циклона. Очищенный газ поворачивает вверх и выходит через выхлопной патрубок циклона. Циклоны могут эффективно улавливать частицы размером более 10 мкм.

Работа циклона характеризуется коэффициентом полезного действия  $\eta$ , равным отношению количества уловленной пыли, к количеству пыли, поступающей в циклон с газом, и коэффициентом сопротивления циклона  $\xi$ , зависящим от его конструкции.

#### Описание установки

Установка (рис. 4) состоит из вентилятора 7, приводимого во вращение электродвигателем, трубопровода 2, в который вставлена гидравлическая труба, присоединенная к микроманометру 3, для измерения скорости воздуха, питателя 4 для введения пыли в поток воздуха, циклона 5, водяного

дифманометра 6 для измерения перепада давления в циклоне, и приемника 8. Для регулировки скорости (расхода) воздуха на вентиляторе имеется задвижка 7, а также задвижка на выхлопной трубе 9.

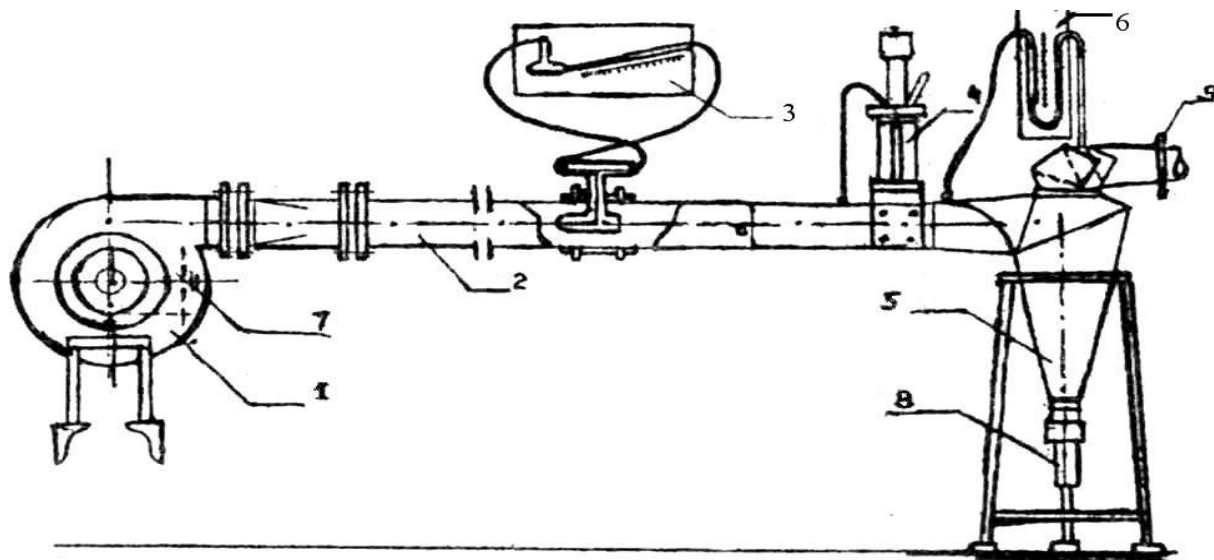


Рис. 4. Схема установки циклона: 1- вентилятор, 2 - трубопровод, 3 - тягомер, 4 - питатель, 5 - циклон, 6 - водяной манометр, 7,9- задвижка, 8 - приемник пыли

#### Методика проведения работы

Рычаг питателя 4 устанавливают в верхнее положение. Берут навеску пыли  $G = (50 - 100)$  г (пыль должна быть хорошо высушена) и через воронку загружают в питатель. К нижней части циклона присоединяют чистый приемник пыли 8. Полностью открывают задвижку 9. После этого включают рубильником двигатель вентилятора и задвижкой 7 устанавливают скорость воздуха. В таблицу записывают показания тягомера и дифманометра. Цена деления тягомера 0.2 мм водяного столба; цифры на шкале дают напор в миллиметрах водяного столба. При условии, что жидкость в дифманометре 6 перед пуском находится на нулевой отметке, цифры на шкале указывают непосредственно перепад давлений, при этом одно деление соответствует 2 мм водяного столба. Если в начале уровень жидкости выше или ниже нулевой отметки, то перепад давлений отсчитывают по разности уровней жидкости, причем цена одного деления равна 1 мм вод. ст. Выключают двигатель вентилятора. Приемник 8 отсоединяют от циклона и взвешивают собранную в нем пыль. Количество массы пыли  $G_n$ , загруженной в питатель, и количество, уловленное в приемнике  $G_{ул}$ , заносят в таблицу наблюдений.

#### Техника безопасности

Вентилятор приводится во вращение электродвигателем. Корпус электродвигателя заземлен и безопасен. Внутреннее устройство электродвигателя находится под напряжением. Поэтому в случае каких-либо неполадок в работе студентам запрещается пытаться устранить их

самостоятельно. Запрещается касаться вращающихся деталей двигателя и вентилятора.

#### Обработка опытных данных

Коэффициент полезного действия определяют по формуле

$$\eta = (G_{\text{ул}}/G_{\text{н}}) 100\%. \quad (3.1)$$

Гидравлическое сопротивление циклона описывается выражением

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi \rho W_{\text{вх}}^2 / 2, \text{ Па} \quad (3.2)$$

где  $\Delta P_{\text{ц}}$  - перепад давлений в циклоне по дифманометру;

$\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$W_{\text{вх}}$  — скорость воздуха во входном патрубке, м/с.

Отсюда

$$\xi = 2\Delta P_{\text{ц}} / \rho W_{\text{вх}}^2. \quad (3.3)$$

Для расчета  $\xi$  по этой формуле перепад давлений, измеренный в мм вод. столба, пересчитывают в паскалях. Плотность воздуха принять равной  $\rho = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>.

Скорость во входном патрубке  $W_{\text{вх}}$  связана со скоростью воздуха в трубопроводе (из соотношения геометрических размеров) зависимостью

$$W_{\text{вх}} = 1.18 W_{\text{тр}}, \text{ м/с}. \quad (3.4)$$

Скорость воздуха в трубопроводе.

$$W_{\text{тр}} = 0.84 \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{Т}}}{\rho}}, \quad (3.5)$$

где  $\Delta P_{\text{Т}}$  - напор, Па.

Таблица 3. Экспериментальные данные испытания циклона

Начальное количество пыли, $G_{\text{н}}$ , г	Количество уловленной пыли, $G_{\text{ул}}$ , г	Показания тягомера		Показания дифманометра		КПД циклона $\eta$	Коэффициент сопротивления $\xi$
		мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па		

#### Список рекомендуемой литературы

Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов /А.Г. Касаткин. М.: Альянс, 2008. 750 с.

#### Контрольные вопросы

1. Можно ли заменить мультициклон одним большим циклоном такой же производительности? Что при этом изменится?
2. Работа электрофильтра. Почему осадительный и коронирующий электроды имеют различную конструкцию и размеры?
3. В чем недостатки рукавного и металлокерамического фильтров?
4. Что такое степень очистки?
5. Виды фильтровальных перегородок.
6. Мокрая очистка газов. Достоинства и недостатки мокрой очистки.

7. В каких аппаратах осуществляется инерционная очистка газов, в том числе и под действием центробежных сил?

#### Лабораторная работа № 4

### Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»

Цель работы. Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи и сравнение его с коэффициентом теплопередачи, вычисленным на основе критериальных зависимостей, приведенных в справочной литературе.

В теплообменниках тепло передается от одной среды (теплоносителя) к другой среде (теплоносителю) через твердую стенку. Процесс теплообмена включает в себя три стадии: перенос тепла от теплоносителя с более высокой температурой к поверхности стенки, перенос тепла через стенку посредством теплопроводности и перенос тепла от противоположной стенки ко второму теплоносителю.

Количество тепла, передаваемое через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между теплоносителями, равной одному градусу, называется коэффициентом теплопередачи. Он зависит от физических свойств жидкостей и гидродинамики их потоков.

Одним из типов теплообменников является теплообменник типа «труба в трубе». В нем один из теплоносителей проходит внутри трубы, концентрически расположенной во второй трубе, а второй теплоноситель - по кольцевому пространству между трубами. Теплообменники такого типа целесообразно применять при небольших расходах теплоносителей. В них можно осуществлять сравнительно высокие скорости сред при небольших гидравлических сопротивлениях, что обеспечивает высокие коэффициенты теплопередачи при умеренных затратах на транспорт теплоносителей.

#### Описание установки

Теплообменник 1 (рис. 5) состоит из трех секций, соединенных последовательно. Внутренние трубы латунные, диаметром (16x1.2) мм, внешние - стальные, диаметром (40x2) мм. Теплоносителями служит водопроводная вода. Один поток воды проходит через электрообогреватель 2 и поступает во внутреннюю трубу. Второй поток холодной воды проходит через кольцевые пространства между внешней и внутренней трубами. Оба потока на выходе из теплообменника сливаются в раковину 12. Замер расходов холодной и горячей воды осуществляется при помощи ротаметров 3 и 4, соответственно, а регулировка при помощи вентилей 5 и 6. Температуру воды на входе и на выходе из теплообменника измеряют с помощью термопар или термометром.

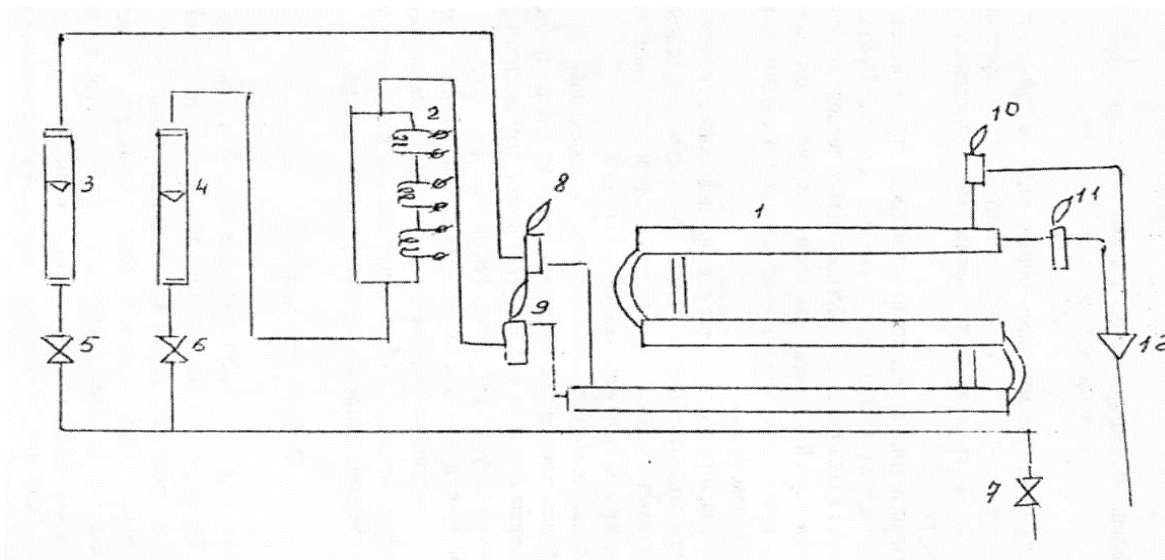


Рис.5. Схема установки для определения коэффициента теплопередачи от жидкости к жидкости: 1 - теплообменник типа «труба в трубе»; 2 – подогреватель; 3,4–ротаметр; 5,6,7 - вентили; 8,9,10,11- термопары; 12 - сливная воронка

### Методика проведения работы

Открывают вентиль 7 на линии подачи воды из водопровода, а затем вентили 5 и 6, по ротаметрам устанавливают заданные расходы горячей и холодной воды. Включают электронагревательные приборы. Когда температуры перестанут изменяться, записывают показания ротаметров в таблицу экспериментальных данных. Выключают установку в следующем порядке: выключают нагревательные приборы, закрывают вентили 5, 6 и 7.

### Техника безопасности

Запрещается включать электронагреватели до включения подачи воды и появления ее в сливных трубах, а также выключать подачу воды ранее выключения электронагревателей. В случае прекращения стока воды из сливных труб необходимо немедленно выключить электронагреватели.

### Обработка опытных данных

1. Вычисляют массовый расход холодной воды  $G_2$ , умножая величину объемного расхода  $v_2$ , определенного по показаниям соответствующего ротаметра и градуировочного графика на плотность воды  $\rho_v$ , кг/м<sup>3</sup>. Аналогично определяют массовый расход горячей воды.

2. Рассчитывают количество тепла переданного холодной воде (тепловую нагрузку теплообменника), Вт:

$$Q = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}), \quad (4.1)$$

где  $t_{2к}$  и  $t_{2н}$  - температуры холодной воды на входе и выходе из теплообменника, °С;

$c_2$  - теплоемкость воды при ее средней температуре, Дж/кг град.

$$t_{2ср} = (t_{2к} + t_{2н}) / 2.$$

3. Температуру воды на входе и на выходе из теплообменника определяют с помощью термопар. Кроме того, ее можно найти с помощью термометра, тогда температуру горячей воды на входе в теплообменник можно

приближенно вычислить исходя из одинакового количества переданного тепла от горячей к холодной воде

$$G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}), \quad (4.2)$$

где  $t_{1н}$ ,  $t_{1к}$  - начальная и конечная температуры горячей воды, °С,  $c_1$  - теплоемкость горячей воды, взятой приближенно при  $t_{1к}$ .

4. Вычисляют среднюю разность температур в теплообменнике по формуле

$$\Delta t_{ср} = (\Delta t_{вх} - \Delta t_{вых}) : 2.3 \lg(\Delta t_{вх} / \Delta t_{вых}), \quad (4.3)$$

где  $\Delta t_{вх} = t_{1н} - t_{2н}$ ;  $\Delta t_{вых} = t_{1к} - t_{2к}$ ; Если  $\Delta t_{вх} / \Delta t_{вых} < 2$ , то среднюю разность температур приближенно принимают равной средней арифметической:

$$\Delta t_{ср} = (\Delta t_{вх} + \Delta t_{вых}) / 2. \quad (4.4)$$

5. Определяют опытный коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup> град:

$$K = Q / F \Delta t_{ср}, \quad (4.5)$$

где  $F = 0.13 \text{ м}^2$  - общая поверхность теплообмена в аппарате.

#### Расчет коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи, являющийся кинетическим коэффициентом уравнения теплопередачи при теплообмене через плоскую стенку или тонкостенную трубку ( $d_{вн} / d_{н} > 0.5$ ), связан с кинетическим коэффициентом  $\alpha$  (коэффициентом теплоотдачи), его можно выразить соотношением

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + r_1 + \frac{\delta}{\lambda} + r_2 + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4.6)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей и холодной воды, Вт/м<sup>2</sup>град;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности внутренней трубы, Вт/м<sup>2</sup>град (материал трубы - латунь);  $\delta = 0.0012$  м — толщина стенки внутренней трубы;  $r_1$ ,  $r_2$  - термические сопротивления загрязнения стенки трубы со стороны горячего и холодного теплоносителя, м<sup>2</sup>град/Вт (принимаются по справочнику).

Для определения коэффициентов теплоотдачи вычисляют значения критериев Нуссельта - Nu. Предварительно устанавливают режим течения жидкости во внутренней трубе и в кольцевом пространстве между внутренней и внешней трубой по величине критерия Рейнольдса:

$$Re = (W d_{эКВ} \rho) / \mu. \quad (4.7)$$

Для горячего потока во внутренней трубе скорость течения жидкости  $W_1$  ( $d_{эКВ} = d_{вн}$  - внутреннему диаметру трубы, м) вычисляем по уравнению

$$W_1 = v_1 / 0.785 (d_{эКВ}^2), \text{ м/с}, \quad (4.8)$$

где  $v_1$  - объемный расход горячей воды,  $\rho_1, \mu_1$  - плотность и вязкость воды при средней температуре горячей воды

$$t_{1ср} = t_{ср} + \Delta t_{ср}. \quad (4.9)$$

Для потока холодной воды в кольцевом пространстве скорость течения жидкости

$$W_2 = v_2 / 0.785 (D_{вн}^2 - d_1^2), \text{ м/с}, \quad (4.10)$$

$$d_{эКВ} = D_{вн} - d_н, \quad (4.11)$$



где  $v_2$  – объемный расход холодной воды,  
 $D_{\text{вн}}=0.036$  м – внутренний диаметр наружной трубы,  
 $d_{\text{н}}=0.016$  м - наружный диаметр внутренней трубы.  
 $\rho_2, \mu_2$  - принимаем при средней температуре холодной воды.

Если  $Re < 2300$  - режим ламинарный;  
 если  $2300 < Re < 10000$  - режим переходный;  
 при  $Re > 10000$  - режим турбулентный.

При ламинарном режиме  $Nu=0.74Re^{0.2} Pr^{0.3} Gr^{0.1}$ . (4.12)

При переходном режиме  $Nu=0.008Re^{0.9} Pr^{0.4}$ . (4.13)

При турбулентном режиме  $Nu=0.23Re^{0.8} Pr^{0.4}$ . (4.14)

Здесь  $Pr = c\mu / \lambda$ - критерий Прандтля, (4.15)

$Gr=d_{\text{экв}}^3 \rho^2 g \beta \Delta t / \mu^2$ - критерий Грасгофа, (4.16)

где  $\beta$  - коэффициент объемного расширения воды, 1/град,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Delta t$  - разность температур между стенкой и водой. Все физические константы применяют при средних температурах горячей и холодной воды.

Разность температур между стенкой и водой  $\Delta t=t_{\text{cp}} \pm t_{\text{ст}}$  предварительно задают, а затем уточняют ее по методике, описанной ниже.

Значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  находят по формуле

$$\alpha = Nu \lambda / d_{\text{экв}}. \quad (4.17)$$

При наличии переходного или ламинарного режима течения жидкости расчетные значения  $K$  могут получиться ниже опытных, так как критериальные формулы приближенные и недостаточно отражают проявление свободной конвекции в горизонтальных трубах.

### Определение $\Delta t$ и коэффициента теплоотдачи в случае ламинарного режима движения одного из теплоносителей

Расчет проводят для установившегося процесса теплопередачи,  $q_1=q_2=q_3$  (рис.6).

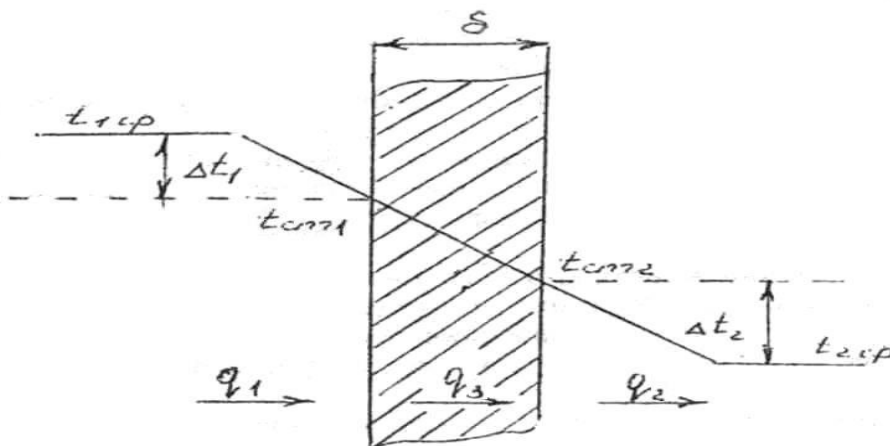


Рис.6. Схема распределения температур теплоносителей

Предположим, что для горячей воды выдерживается переходный или турбулентный режим движения, а для холодной - ламинарный. В этом случае коэффициент теплоотдачи от горячей воды к стенке ( $\alpha_1$ ) рассчитывают по уравнениям (4.13) или (4.14) и (4.17) без учета  $\Delta t_1$ . Задаются температурой  $t'_{ст1}$  из условия  $t_{2cp} < t_{ст1} < t_{1cp}$  и определяют удельный поток тепла:

$$q_1 = \alpha_1(t_{1cp} - t_{ст1}), \text{Вт/м}^2. \quad (4.18)$$

Принимая  $q_1 \approx q_2$  и из уравнения

$$q_3 = (t_{ст1} - t_{ст2}) / ((\delta/\lambda) + \sum r) \quad (4.19)$$

рассчитывают  $t_{ст2}$ :

$$t_{ст2} = t_{ст1} - q_3((\delta/\lambda) + \sum r). \quad (4.20)$$

Определяют  $\Delta t = t_{ст2} - t_{2cp}$ , критерий Gr и  $\alpha$  по уравнениям, приведенным выше (4.16 и 4.17). Рассчитывают удельный тепловой поток,  $q_2$ ,  $\text{Вт/м}^2$ :

$q_2 = \alpha_2(t_{ст2} - t_{2cp})$ , при этом получают  $q_2 \neq q_1 \approx q_3$ .

Вновь задаются  $t_{ст1}$ , отличающейся от первого значения на 2-3°C и повторяют расчет. Истинные значения  $t_{ст1}$ ,  $t_{ст2}$  и  $q$  находят графической экстраполяцией, как это показано на рис. 7 и проводят третий проверочный расчет.

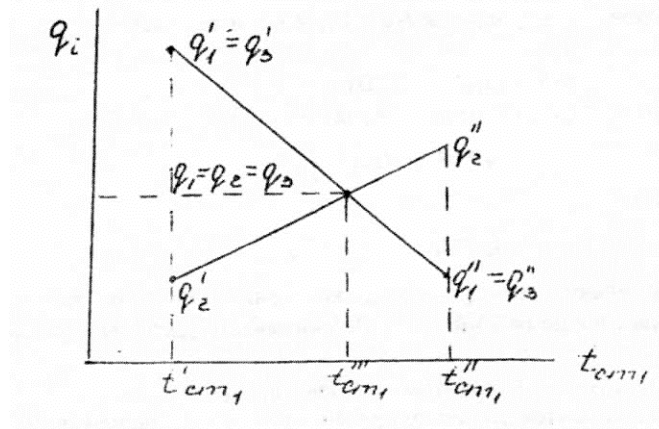


Рис.7. Схема определения температуры стенки

Таблица 4. Параметры установившегося режима

Температура горячей воды, °С		Температура холодной воды, °С		Расход горячей воды		Расход холодной воды	
на входе	на выходе	на входе	на выходе	Показания ротаметра, дел.	$v_1, \text{м}^3/\text{с}$	Показания ротаметра, дел.	$v_2, \text{м}^3/\text{с}$
$t_{1н}$	$t_{1к}$	$t_{2н}$	$t_{2к}$				

### Список рекомендуемой литературы

Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов /А.Г. Касаткин. М.: Альянс, 2008. 750 с.

### Контрольные вопросы

1. Почему теплопередача зависит от гидродинамики движения теплоносителя?
2. Физический смысл коэффициентов  $\alpha$  и  $K$ . Их взаимосвязь.
3. Как находится истинная температура стенки?
4. В каком случае применяются температурные компенсаторы и какие конструкции Вы знаете?
5. Зачем нужны многоходовые кожухотрубные теплообменники?
6. Что собой характеризуют критерии Нуссельта, Грасгофа, Рейнольдса, Прандтля?
7. Виды передачи тепла и их описание.
8. Виды теплообменников и их конструкции.
9. Описать конструкцию различных теплообменников (кожухотрубных, оросительных, пластинчатых, пластинчато – ребристых, спиральных, блочных, оребренных).