

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ
по дисциплине
Процессы и аппараты

для студентов направления подготовки 18.03.01 Химическая технология
профиль Химический инжиниринг и цифровые технологии

Ставрополь, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Цель и задачи освоения дисциплины.

Целями освоения дисциплины «Процессы и аппараты» являются:

- познакомить студентов с теоретическими основами типовых химико-технологических процессов;
- большое внимание уделяется математическому моделированию и анализу химико-технологических систем;
- на конкретных примерах отдельных производств рассматриваются общие научные принципы и закономерности химической технологии.

Задачи освоения дисциплины:

- развитие навыков расчета химико-технологических процессов;
- развитие навыков анализа и моделирования.

При подготовке к практическим занятиям необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы аспирант сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов.

Теоретические вопросы для подготовки к практическим занятиям:

Часть 1. Основные закономерности протекания химико-технологических процессов.

На жидкость, находящуюся в состоянии движения или покоя, действуют объемные и поверхностные силы.

Характеристикой интенсивности силы тяжести является удельный вес.

На каждый элемент данного объема жидкости действуют объемные силы.

Характеристикой интенсивности поверхностных сил является напряжение на поверхности.

Уравнение расхода жидкости $Q = wS$; $M = wSp$.

Режим движения жидкости при $Re < 2300$ ламинарный.

Режим движения жидкости при $Re > 10000$ турбулентный.

Критическое значение критерия Рейнольдса 2300

Критерий Рейнольдса:

$$Re = wd\rho/\mu$$

$$Re = wd/\nu$$

Потенциал переноса - удельная (отнесенная к единице объема) масса, энергия или количество движения.

В неподвижных средах и в ламинарно движущихся потоках осуществляется молекулярный перенос субстанции.

Первым законом Фика описывается молекулярный перенос массы.

Законом Фурье описывается молекулярный перенос энергии.

Уравнение для молекулярного переноса импульса (с учетом закона внутреннего трения Ньютона):

$$\vec{q}_{mw} = -\mu \vec{\text{grad}} w$$

$$\vec{q}_{mw} = -\mu \vec{\text{grad}} (pw)/\rho$$

Уравнение неразрывности (сплошности) потока для неустановившегося движения:

$$dp/dt = -\rho \vec{\text{div}} w$$

Уравнение неразрывности (сплошности) потока для установившегося движения:

$$\vec{\text{div}} w\rho = 0$$

Уравнение неразрывности (сплошности) потока в интегральной форме для установившегося движения:

$$w\rho S = \text{const}$$

Интегралом дифференциальных уравнений движения Эйлера для установившегося потока является уравнение Бернулли.

Интегралом дифференциальных уравнений равновесия Эйлера для покоящейся жидкости является уравнение гидростатики.

Часть 2. Основы моделирования на примере теории подобия.

Метод решения задач исследования и расчета химико-технологических процессов – теоретический метод (моделирование).

Условия, которые полностью, однозначно характеризуют данное явление – условия однозначности.

Условия однозначности включают: геометрическую форму и размеры системы; физические свойства веществ; начальные условия; граничные условия.

Моделирование - исследование объектов познания на их моделях

Основу теории подобия составляет метод обобщенных переменных

Одним из основных принципов теории подобия является выделение из класса явлений, описываемых общим законом, группы подобных явлений

Подобными называют такие явления, для которых отношение сходственных и характеризующих их величин постоянны.

Геометрическое подобие предполагает, что сходственные размеры модели и натуре параллельны, а их отношение выражается постоянной величиной.

Константа геометрического подобия (масштабный множитель):

$$D_1/D_2=L_1/L_2=l_1/l_2=\dots=a_l=\text{const}$$

Константа временного подобия:

$$T_1/T_2=\tau_1/\tau_2=a_\tau=\text{const}$$

Константы физического подобия:

$$\mu_1/\mu_2=\text{const}, \rho_1/\rho_2=\text{const}, u_1/u_2=\text{const}$$

В общем случае константы физического подобия неравны.

Безразмерные числа i , выражающие отношение двух однородных величин в подобных системах называются инвариантами подобия.

В зависимости от соотношения размеров модели и натуре инварианты подобия не изменяются

Инварианты подобия, представляющие собой отношение однородных величин, называют симплексами или параметрическими критериями

Инварианты подобия, представляющие собой отношение разнородных величин, называют критериями подобия

Равенство критериев подобия – единственное количественное условие подобия процессов

Если отношение констант подобия равно 1, оно носит название индикатора подобия

Если константы подобия найдены из условий однозначности, то образованные из них критерии называют определяющими.

Критерий подобия, в который входит искомая величина, называют определяемым.

Обобщенное (критериальное) уравнение:

$$f(K_1, K_2, K_3, \dots) = 0$$

$$K_1 = f(K_2, K_3, \dots)$$

$$K_1 = AK_2^n K_3^m, \dots$$

В основе метода анализа размерностей лежит π -теорема Бекингема.

Критерий гомохронности характеризует неустановившееся состояние процесса:

$$Ho = w\tau/l$$

Критерий Эйлера характеризует влияние перепада гидростатического давления на движение жидкости:

$$Eu = \Delta P / (\rho w^2)$$

$$Eu = P / (\rho w^2)$$

Критерий Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам трения и определяет режим движения во всех сходственных точках подобных систем:

$$Re = wd\rho/\mu$$

$$Re = wd/\nu$$

Критерий Фруда характеризует влияние сил тяжести на движение жидкости:

$$Fr = w^2/gl$$

Обобщенное критериальное уравнение гидродинамики:

$$f(Ho, Eu, Fr, Re) = 0$$

$$f_1(Ho, Fr, Re) = Eu$$

Мгновенная скорость потока в любой точке аппарата или его модели - поле скоростей в потоке.

Модели гидродинамической структуры потоков - упрощенные теоретические модели движения сред в аппаратах.

Кривая изменения концентрации в потоке на выходе - кривая отклика (выходная кривая).

В аппарате идеального вытеснения частицы потока движутся параллельно друг другу с одинаковой скоростью, поперечное и продольное перемешивание отсутствуют.

В аппарате идеального смешения время пребывания частиц потока распределено неравномерно.

Для модели идеального вытеснения характерным является равномерность скоростей и времени пребывания частиц.

Для модели идеального смешения характерным является равномерность концентраций и температуры по объему.

Параметром, характеризующим ячеечную модель является число ячеек.

Основой диффузионной модели является модель идеального вытеснения, осложненная обратным перемешиванием.

Среднее время пребывания частиц в аппарате идеального вытеснения

$$\tau_{cp} = V_a/Q$$

Продольное перемешивание характеризуют критерием подобия Пекле:

$$Pe_L = wL/D_L$$

Часть 3. Гидравлика.

Гидростатика изучает равновесие жидкостей, находящихся в состоянии относительного покоя.

Основное уравнение гидростатики:

$$z_1 + p_1/(\rho g) = z_2 + p_2/(\rho g)$$

$$z + p/(\rho g) = \text{const}$$

Величину z , характеризующую расстояние данной точки до произвольно выбранной горизонтальной плоскости отсчета называют нивелирной высотой.

Удельную потенциальную энергию положения данной точки над произвольно выбранной плоскостью сравнения характеризует геометрический напор.

Величина $p/(\rho g)$ - гидростатический напор (пьезометрический напор).

Гидростатический напор представляет собой энергию, приходящуюся на единицу веса жидкости, и характеризует удельную потенциальную энергию давления в данной точке.

Сумма потенциальных энергий положения и давления в покоящейся жидкости является величиной постоянной.

Сумма потенциальных энергий положения и давления в покоящейся жидкости равна полному гидростатическому напору

«Давление, создаваемое в любой точке покоящейся несжимаемой жидкости, передается во все стороны с одинаковой силой» - закон Паскаля.

Выражение закона Паскаля:

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2)$$

$$\Delta p = \rho g(z_1 - z_2)$$

Пьезометр, вакуумметр – приборы для измерения давления.

Интегрирование дифференциальных уравнений движения идеальной жидкости дает уравнение Бернулли. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости:

$$z + p/(\rho g) + w^2/(2g) = \text{const} = H$$

Общий или гидродинамический напор:

$$[z + p/(\rho g) + w^2/(2g)]$$

Удельная кинетическая энергия в данном сечении (точке) потока или динамический напор $w^2/(2g)$

Уравнение Бернулли выражает энергетический баланс потока.

Уравнение Гагена-Пуазейля:

$$Q = \Delta p \pi d^4 / (128 \mu L)$$

Уравнение Гагена-Пуазейля используется в случае стационарного ламинарного движения несжимаемой жидкости в трубе круглого сечения

Потери давления на трение при ламинарном режиме пропорциональны скорости w .

Потери давления на трение при турбулентном режиме пропорциональны $w^{1,75}$.

Уравнение расхода жидкости при известной средней скорости:

$$Q = w \pi d^2 / 4$$

Диаметр трубопровода при средней скорости жидкости w :

$$d = [4Q / (\pi w)]^{0,5}$$

Среднюю скорость потока измеряют с помощью дроссельных приборов.

К дроссельным приборам относятся диафрагмы, мерные сопла, труба Вентури. По принципу действия насосы подразделяют на объемные и динамические.

В объемных насосах энергия и давление повышаются в результате вытеснения жидкости телами, движущимися возвратно-поступательно или вращательно.

В динамических насосах энергия и давление жидкости повышаются под действием центробежной силы или сил трения

К объемным насосам относятся поршневые, плунжерные, диафрагменные, шестеренные, винтовые

К динамическим насосам относятся центробежные, осевые, струйные, вихревые

Объем жидкости, подаваемый в нагнетательный трубопровод в единицу времени - производительность насоса

Избыточная удельная энергия, сообщаемая насосом единице массы жидкости – напор.

Напор насоса H рассчитывают по уравнению Бернулли.

Полезная мощность насоса N_n , затрачиваемая им на сообщение жидкости энергии:

$$N_n = \rho g Q H$$

Действительная мощность на валу насоса больше полезной мощности

Задачи

1. В трубопроводе диаметром $96 \times 3,5$ мм течет вода, расход которой $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Вязкость воды $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Чему равен критерий Рейнольдса?
2. В трубопроводе диаметром $96 \times 3,5$ мм течет вода, расход которой $0,36 \text{ м}^3/\text{ч}$. Вязкость воды $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Чему равен критерий Рейнольдса?
3. В трубопроводе диаметром $96 \times 3,5$ мм течет жидкость, расход которой $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Вязкость воды $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, плотность – $1500 \text{ кг}/\text{м}^3$. Чему равен критерий Рейнольдса?
4. В трубопроводе диаметром 66×3 мм течет вода, расход которой $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Вязкость воды $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Чему равен критерий Рейнольдса?
5. Воздух с температурой 50°C подается вентилятором в установку. Диаметр трубопровода 102×6 мм, плотность воздуха $1,09 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $0,02 \text{ мПа} \cdot \text{с}$. Расход воздуха $0,103 \text{ м}^3/\text{с}$. Определить режим движения воздуха.
6. Воздух с температурой 50°C подается вентилятором в установку. Диаметр трубопровода 102×6 мм, плотность воздуха $1,09 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $0,02 \text{ мПа} \cdot \text{с}$. Расход воздуха $0,003 \text{ м}^3/\text{с}$. Определить режим движения воздуха.
7. Воздух с температурой 50°C подается вентилятором в установку. Диаметр трубопровода 57×6 мм, плотность воздуха $1,09 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $0,02 \text{ мПа} \cdot \text{с}$. Расход воздуха $0,003 \text{ м}^3/\text{с}$. Определить режим движения воздуха.
8. Манометр на трубопроводе, заполненном водой, показывает давление $0,19 \text{ МПа}$. Определить высоту, на какую поднимется жидкость в открытом пьезометре над точкой присоединения манометра.
9. Манометр на трубопроводе, заполненном водой, показывает давление $0,15 \text{ МПа}$. Определить высоту, на какую поднимется жидкость в открытом пьезометре над точкой присоединения манометра.
10. Манометр на трубопроводе, заполненном жидкостью плотностью $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$, показывает давление $0,19 \text{ МПа}$. Определить высоту, на какую поднимется жидкость в открытом пьезометре над точкой присоединения манометра.

Часть 4. Тепловые процессы

Процессы, скорость которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты, называют тепловыми.

Аппараты, в которых осуществляются тепловые процессы, называют теплообменниками.

Явление теплопроводности состоит в том, что перенос теплоты происходит путем непосредственного соприкосновения между микрочастицами

Теплопроводность в подвижных средах при турбулентном режиме движения имеет значение в тонком пограничном слое.

В неподвижных средах и при ламинарном режиме движения при отсутствии излучения теплопроводность единственный способ передачи теплоты.

Процесс распространения энергии с помощью электромагнитных колебаний – это тепловое излучение.

Перенос теплоты вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов жидкости или газа – явление конвекции.

Перенос теплоты от более нагретой среды к менее нагретой через разделяющую их стенку называют теплопередачей.

Вещества, участвующие в теплопередаче, называют теплоносителями.

При стационарном процессе теплопередачи температура изменяется в пространстве, не зависит от времени/

При нестационарном процессе теплопередачи температура изменяется в пространстве, изменяется во времени.

Необходимым условием теплопередачи является неравенство температур.

Геометрическое место всех точек с одинаковой температурой представляет собой изотермическую поверхность

Мерой интенсивности изменения температуры в данной точке является температурный градиент.

Основное уравнение теплопередачи:

$$Q = KF\Delta t_{cp}\tau$$

$$Q = KF\Delta t_{cp}$$

Тепловой поток Q определяют по уравнениям теплового баланса:

$$Q = G_1(H_{1н} - H_{1к}) = G_2(H_{2к} - H_{2н})$$

$$Q = G_1c_1(t_{1н} - t_{1к}) = G_2c_2(t_{2к} - t_{2н})$$

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному за 1 с через 1 м² стенки при разности температур между теплоносителями 1 град.

Уравнение теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплопереноса:

$$Q = \lambda(t_{ст.1} - t_{ст.2})F\tau/\delta$$

$$q = \lambda(t_{ст.1} - t_{ст.2})/\delta$$

Величина λ/δ характеризует тепловую проводимость стенки.

Величина δ/λ характеризует термическое сопротивление стенки.

Для многослойной стенки общее термическое сопротивление равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев.

Расчет скорости теплоотдачи осуществляют с помощью закона охлаждения Ньютона (уравнения теплоотдачи).

Уравнение теплоотдачи:

$$Q = \alpha(t_{ж} - t_{ст})F\tau$$

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество теплоты передается от теплоносителя к 1 м² стенки в единицу времени при разности температур между теплоносителем и стенкой в 1 град.

Зависимости для расчета скорости процесса теплоотдачи получают преобразованием дифференциальных уравнений методом теории подобия.

Критерий Фурье характеризует условия подобия неустановившихся процессов теплоотдачи.

Критерий Фурье является аналогом критерия гомохронности.

Выражение для критерия Фурье:

$$Fo = \alpha\tau/l^2$$

Критерий Пекле характеризует соотношение между интенсивностью переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью в движущемся потоке

Выражение для критерия Пекле:

$$Pe = wl/\alpha$$

Критерий Нуссельта характеризует отношение суммарного переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью к теплоте, передаваемой теплопроводностью.

Выражение для критерия Нуссельта:

$$Nu = \alpha l/\lambda$$

Критерий Нуссельта является определяемым.

Критериальное уравнение теплоотдачи:

$$f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr, Re)=0$$

$$Nu = f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re)$$

Для установившегося процесса теплоотдачи критериальное уравнение:

$$f(Nu, Pe, Fr, Re)=0$$

$$Nu = f(Pe, Fr, Re)$$

Критерий Пекле представляют в виде произведения следующих безразмерных комплексов:

$$Pe=RePr$$

Критерий Прандтля характеризует подобие физических свойств теплоносителей

Критерий Прандтля:

$$Pr = \nu/a$$

Критерий Фруда может быть исключен из критериального уравнения в случае вынужденной теплоотдачи.

Критерий Фруда отражает действие сил тяжести:

$$Fr = w^2/(gl)$$

При естественной конвекции критерий Фруда заменяют производным критерием Архимеда:

$$Ar=(gl^3/\nu^2)(\Delta\rho/\rho)$$

$$Ar=Ga\Delta\rho/\rho$$

Критерий Галилея : $Ga=gl^3/\nu^2$

Теплоотдача при конденсации насыщенных паров протекает при постоянной температуре. При конденсации насыщенных паров происходит одновременный перенос теплоты и массы.

При конденсации насыщенных паров перенос теплоты определяется теплотой парообразования.

При конденсации насыщенных паров перенос массы определяется количеством сконденсированного пара.

Конденсацию пара, при которой на хорошо смачиваемых поверхностях капли конденсата образуют жидкую пленку, стекающую вниз под действием силы тяжести, называют пленочной.

Конденсацию пара, при которой на несмачиваемых поверхностях капли конденсата не образуют жидкую пленку, называют капельной.

Задачи:

1. Начальная температура воды 10⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 1240 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31⁰С.
2. Начальная температура воды 5⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 1240 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 95 до 31⁰С.
3. Начальная температура воды 10⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 620 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31⁰С.
4. Начальная температура воды 10⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 124 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31⁰С.
5. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 75 мм. Температура стенки аппарата 146⁰С, наружной поверхности изоляции 40⁰С. Поверхность теплопередачи 40м², коэффициент теплопроводности асбеста 0,151 Вт/ мК. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?

6. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 150 мм. Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 40 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151\text{ Вт/ мК}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
7. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 75 мм. Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 10 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151\text{ Вт/ мК}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
8. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 150 мм. Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 10 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151\text{ Вт/ мК}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
9. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 30 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116\text{ Вт/ мК}$. Какое количество теплоты теряется паропроводом с 1 м^2 ?
10. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 60 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116\text{ Вт/ мК}$. Какое количество теплоты теряется паропроводом с 1 м^2 ?
11. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 15 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116\text{ Вт/ мК}$. Какое количество теплоты теряется паропроводом с 1 м^2 ?

Часть 5. Массообменные процессы

Процессы, в которых основную роль играет перенос вещества из одной фазы в другую, называют массообменными.

Движущей силой массообменных процессов является разность химических потенциалов.

Движущая сила массообменных процессов характеризует степень отклонения системы от состояния равновесия

В пределах данной фазы вещество переносится от точки с большей концентрацией в точку с меньшей (от точки с большим химическим потенциалом в точку с меньшим).

Обычно в расчетах приближенно движущую силу выражают через разность концентраций.

Избирательное поглощение газов или паров жидким поглотителем – абсорбция.

Абсорбция – это переход вещества из газовой (паровой) фазы в жидкую.

Перегонка и ректификация – разделение жидких гомогенных смесей на компоненты при взаимодействии потоков жидкости и пара

Экстракция – извлечение растворенного в одной жидкости вещества другой жидкостью практически не смешивающейся с первой.

Адсорбция – избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ твердым поглотителем.

Избирательное извлечение ионов из растворов электролитов - ионный обмен.

Процесс перехода влаги из твердого влажного материала в газовую или паровую фазы - сушка.

Кристаллизация – выделение твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов

Мембранные процессы – избирательное извлечение компонентов смеси или их концентрирование с помощью полупроницаемых перегородок

Процесс перехода вещества из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называется массопередачей.

Массопередача осуществляется при непосредственном соприкосновении фаз или через разделяющую фазы мембрану.

Граница соприкосновения фаз может быть подвижной или неподвижной.

Перенос вещества из фазы к границе раздела фаз или наоборот называется массоотдачей.

Процессы массопереноса обычно обратимые.

Направление перехода вещества из одной фазы в другую определяется концентрациями вещества в фазах и условиями равновесия.

Массообменные процессы протекают только при нарушении фазового равновесия.

Переход вещества в неподвижной среде из внутренних слоев одной фазы через границу раздела фаз и распределение по всему объему второй фазы называется молекулярной диффузией.

Молекулярная диффузия является следствием теплового движения молекул.

Молекулярной диффузии основное сопротивление оказывают силы внутреннего трения.

Перенос вещества движущимися частицами потока в условиях турбулентного движения фаз называют конвективным переносом (конвективной диффузией).

Скорость перехода вещества из одной фазы в другую пропорциональна разности между рабочей и равновесной концентрациями.

Основным кинетическим уравнением массообменных процессов является уравнение массопередачи:

$$M = K_{x(y)} F \Delta x(y)_{\text{ср}} \tau$$

$$M = K_{x(y)} F \Delta x(y)_{\text{ср}}$$

В основное уравнение массопередачи входит кинетический коэффициент массопередачи, который показывает, какое количество вещества переходит из одной фазы в другую в единицу времени через единицу поверхности раздела фаз при движущей силе равной 1. Уравнение массопередачи применяют для определения поверхности контакта фаз и размера массообменных аппаратов.

Величина поверхности контакта фаз в процессах со свободной границей зависит от гидродинамического режима.

Для процессов абсорбции, десорбции, перегонки, ректификации, жидкостной экстракции характерна свободная граница раздела фаз.

Основное сопротивление переносу массы в движущемся потоке оказывает пограничный слой.

В ламинарном потоке пограничный слой увеличивается и заполняет все сечение потока.

Конвективный перенос идет в направлении, параллельном движению потока, а перенос к границе раздела фаз определяется молекулярной диффузией в случае ламинарного режима.

Уравнение массоотдачи:

$$M = (x_{\text{гр}} - x) F \tau$$

$$M = \beta_y (y - y_{\text{гр}}) F \tau$$

Коэффициент массоотдачи β_x (β_y) показывает, какое количество вещества переходит от единицы поверхности раздела фаз в ядро потока или наоборот в единицу времени при движущей силе равной 1.

Коэффициент массоотдачи характеризует скорость переноса вещества внутри фазы конвекцией и молекулярной диффузией одновременно.

На границе раздела фаз отсутствует сопротивление процессу, равновесие устанавливается очень быстро.

Диффузионный критерий Нуссельта характеризует отношение скорости переноса вещества конвективной и молекулярной диффузией к молекулярному переносу.

Выражение для диффузионного критерия Нуссельта:

$$Nu' = \beta l / D$$

Диффузионный критерий Фурье характеризует условия подобия неустановившихся процессов теплоотдачи.

Диффузионный критерий Фурье является аналогом критерия гомохронности и теплового критерия Фурье.

Выражение для диффузионного критерия Фурье:

$$Fo' = D\tau/l^2$$

Диффузионный критерий Пекле характеризует соотношение между интенсивностью переноса вещества конвекцией и молекулярной диффузией.

Выражение для диффузионного критерия Пекле:

$$Pe' = wl/D$$

Диффузионный критерий Пекле представляют в виде произведения следующих безразмерных комплексов:

$$Pe' = RePr'$$

Диффузионный критерий Прандтля характеризует подобие физических свойств.

Диффузионный критерий Прандтля:

$$Pr' = \nu/D$$

Диффузионный критерий Нуссельта является определяемым.

Критериальное уравнение массоотдачи:

$$f(Re, Fo', Nu', Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots) = 0$$

$$Nu' = f(Fo', Re, Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Для установившегося процесса массоотдачи критериальное уравнение:

$$f(Nu', Re, Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots) = 0$$

$$Nu' = f(Re, Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Уравнение аддитивности фазовых сопротивлений:

$$K_y = 1/(1/\beta_y + m/\beta_x)$$

$$K_x = 1/(1/\beta_y m + 1/\beta_x)$$

В уравнении аддитивности фазовых сопротивлений знаменатель представляет собой суммарное фазовое сопротивление.

Коэффициент массопередачи находят по уравнению аддитивности фазовых сопротивлений.

Относительное движение фаз влияет на процесс массообмена.

Схема относительного движения, при которой фазы движутся в одном и том же направлении – прямоток.

Схема относительного движения, при которой фазы движутся в противоположных направлениях – противоток.

Относительное движение фаз на величину движущей силы процесса массообмена влияет.

Движущая сила процесса массопередачи:

$$\Delta y_{cp} = (\Delta y_b - \Delta y_m) / \ln (\Delta y_b / \Delta y_m)$$

1. Критерии оценивания компетенций

Текущая аттестация студентов проводится преподавателем, ведущим лекционные и лабораторные занятия по дисциплине. Максимальное количество баллов студент получает, если он активно участвует в работе, владеет материалом, умеет логично и четко излагать мысли, творчески подходит к решению основных вопросов темы, показывает самостоятельность мышления.

Основанием для снижения оценки являются:

- слабое знание темы и основной терминологии;
- пассивность участия в групповой работе;
- отсутствие умения применить теоретические знания для решения практических задач;
- несвоевременность предоставления выполненных работ.

Литература:

Основная литература:

1. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. : учеб. пособие / [Д. А. Баранов, В. Н.

- Блиничев, А. В. Вязьмин и др.] ; под ред. А. М. Кутепова, Т. 2, Механические и гидромеханические процессы. – М. : Логос, 2011. – 600 с.
2. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. : учеб. пособие / [Д. А. Баранов, А. В. Вязьмин, А. А. Гухман и др.] ; под ред. А. М. Кутепова, Т. 1, Основы теории процессов химической технологии. – М. : Логос, 2012. – 480 с.
3. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учебник : в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский, Ч.2, Массообменные аппараты и процессы. – 3-е изд. – М. : Химия, 2010. – 368 с

Дополнительная литература:

1. Бесков В.С., Сафронов В.С. Общая химическая технология и основы промышленной экологии. М.: Химия, 1999.
 2. Кутепов А.М. и др. Общая химическая технология. М.: Высш. шк., 1990.
 3. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Химия, 1988.
 4. Мухленов И.П. и др. Основы химической технологии. М.: Высш. шк., 1991.
 5. Сафонов М.С. Критерии термодинамического совершенства технологических систем. М.: МГУ, 1998.
- 9.1.3 Методическая литература:**

Интернет-ресурсы:

1. <http://ru.wikipedia.org> - электронная энциклопедия.
 2. <http://www.koob.ru> – электронная библиотека.
 3. <http://www.iqlib.ru> – Электронно-библиотечная система.
 4. <http://studentam.net> – электронная библиотека учебников.
- www.dissercat.ru – электронная библиотека диссертационных работ.

Программное обеспечение:

Специализированное программное обеспечение не требуется

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
Для лабораторных работ
по дисциплине
«Процессы и аппараты»

Направление подготовки	18.03.01 Химическая технология
Направленность (профиль)	Химический инжиниринг и цифровые технологии

Ставрополь, 2026

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Для изучения процессов, происходящих в капельных жидкостях и газах, необходимо иметь информацию о характере движения жидкости в каналах. Английским физиком Осборном Рейнольдсом в 1876–1883 гг. на основании экспериментального исследования движения жидкостей при различных скоростях потока, размерах канала и свойств среды было выяснено, что в движущейся по трубе жидкости наблюдается два режима движения. Первый, в котором частицы двигаются по параллельным траекториям, струи жидкости не перемешиваются, был назван *ламинарным*; второй, в котором наблюдаются возмущение, перемешивание частиц и вихреобразование, получил название *турбулентного* режима движения. Критерием оценки стал безразмерный комплекс величин, называемый числом (критерием) Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{v d_3 \rho}{\mu}, \quad (1.1)$$

где v – средняя скорость течения, м/с; ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость рабочей жидкости, Па·с; d_3 – эквивалентный диаметр, м (d_3 при турбулентном течении по трубам не круглого поперечного сечения рассчитывается по формуле $d_3 = \frac{4S}{\Pi}$, где S – поперечное сечение потока, м²; Π – смоченный периметр, м; при ламинарном течении понятие d_3 не применяется).

Для стационарного ламинарного движения, т.е. для гидродинамически стабилизированного течения, не учитывающего возмущения от входного участка, возможно получение точных решений уравнения движения жидкости (уравнений Навье–Стокса).

Так, аналитически получен профиль скорости при ламинарном режиме движения жидкости, представляющий собой в сечении параболу (рис. 1.1). Проблема описания гидродинамической турбулентности заключается, в частности, в том, что пока не удаётся на основании только урав-

нений гидродинамики предсказать, когда именно должен заканчиваться ламинарный и начинаться турбулентный режим.

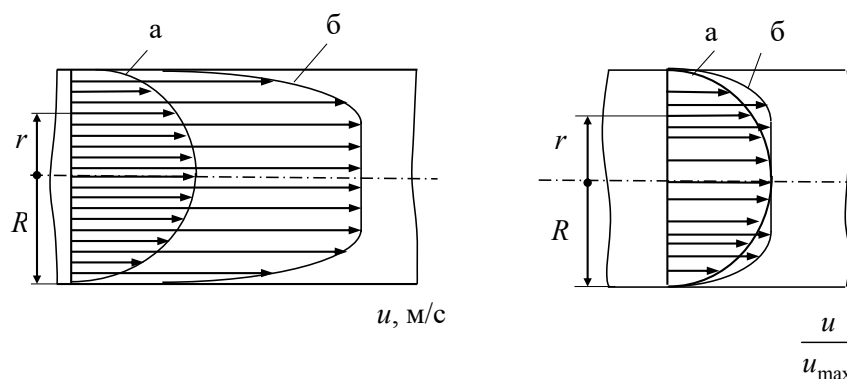


Рис. 1.1. Распределение скоростей в потоке жидкости:
а – ламинарный режим движения, б – турбулентный режим движения
(u – локальная скорость жидкости, м/с)

Турбулентность – одна из наиболее трудных и нерешённых задач в гидродинамике. При развитом турбулентном движении образуются вихри в ядре потока, которые затем дробятся на всё более мелкие. Каскадный процесс дробления вихрей приводит к тому, что энергия турбулентного движения передаётся к вихрям всё меньшего размера, до тех пор, пока не преобразуется во внутреннюю энергию – тепловое движение. Сложное перемешивание жидкости, вихреобразование и случайные флуктуации параметров означают, что при одних и тех же условиях детальная картина распределения скорости и давления в жидкости будет различной и практически никогда не повторяется.

Принято считать, что в прямых круглых трубах критическое число Re равно 2 300. При значениях $Re < 2\,300$ режим движения жидкостей и газов ламинарный, течение при $2\,300 < Re < 10\,000$ называется неустойчивым турбулентным, при $Re > 10\,000$ – развитым турбулентным.

Однако экспериментально было найдено, что критическое значение числа Re в круглых трубах может находиться в диапазоне $2\,300 \div 20\,000$. Такие высокие значения критического числа Re обусловлены особыми

условиями проведения опытов: постоянной температурой, стабилизацией расхода, отсутствием возмущений потока, малыми значениями шероховатости стенок и т.д. Для идеально равномерного профиля скорости на идеально гладкой поверхности критическое число Re стремится к бесконечности. На практике принято считать турбулентным поток при $Re > 2300$, однако при наличии дополнительных турбулизаторов, ламинарное течение заканчивается при гораздо более низких значениях чисел Рейнольдса.

Для описания турбулентного движения используются уравнения гидродинамики для нестационарного течения вязкой жидкости. В современных условиях даже численное решение этих уравнений трудно реализуемо. На мощных компьютерах удаётся получить решение только для некоторых типов турбулентных течений.

В настоящее время наиболее распространённым способом математического моделирования турбулентности является использование осреднения числа Рейнольдса, когда вместо уравнений для мгновенных значений параметров (например, скорости) используются уравнения для неких осреднённых по времени величин. На рис. 1.2 мгновенная скорость u пульсирует около некоторого среднего во времени значения $\bar{u}$. Отклонение мгновенной локальной скорости u от средней во времени называют пульсационными скоростями u' . Таким образом, турбулентное движение можно описать через осреднённые по времени значения скоростей и наложенные на них пульсационные скорости $\bar{u} + u'$.

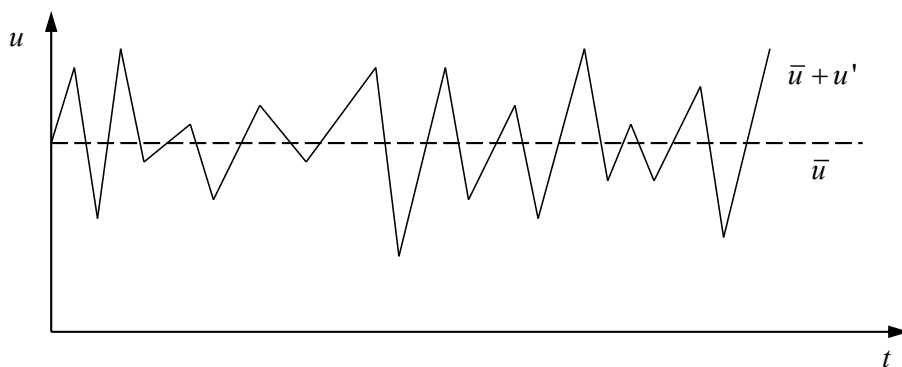


Рис. 1.2. Мгновенная u и осредненная во времени $\bar{u}$ локальные скорости при турбулентном течении потока

Для решения задачи описания турбулентного движения привлекают статистические методы, которые очень перспективны и хорошо описывают процессы, происходящие в турбулентном потоке. Однако решений, подходящих для инженерной практики, до сих пор получить не удалось. Широкое распространение получили различные полуэмпирические модели феноменологического типа, основанные на решении уравнений Навье–Стокса и использовании осреднения числа Рейнольдса. Для расчёта профиля скорости и других параметров турбулентного движения используются различные пакеты программ.

Цель работы: визуально определить режим движения воды в прозрачных круглых гладких прямых трубах разной площади поперечного сечения; найти критическое число Рейнольдса при течении воды в трубах различных диаметров.

Описание установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.3.

Основными элементами лабораторной установки являются две трубы T_1 и T_2 из органического стекла длиной 1200 мм круглого поперечного сечения с внутренним диаметром $d_1 = 35$ мм и $d_2 = 25$ мм. Обе трубы имеют входные раструбы (расширения), способствующие плавному входу жидкости в них.

Входные участки труб находятся в успокоительных резервуарах C_1 и C_2 ; выходные – в демпфирующей (гасящей скорость жидкости) ёмкости E_2 . Водопроводная вода попадает в трубы T_1 и T_2 , где визуально по виду струйки индикатора определяют режим движения воды.

Индикатором является водный раствор фуксина, окрашенная струйка которого поступает из напорного сосуда E_1 через тонкие вводные иглы в соответствующие трубы. Подача воды попеременно в первую или вторую трубу регулируется вентилями B_2 и B_3 , расход воды измеряется ротаметрами (поз. 1 и 2). Для удаления воды из установки после окончания опытов предусмотрены нижние сливные трубопроводы с кранами K_2 , K_3 .

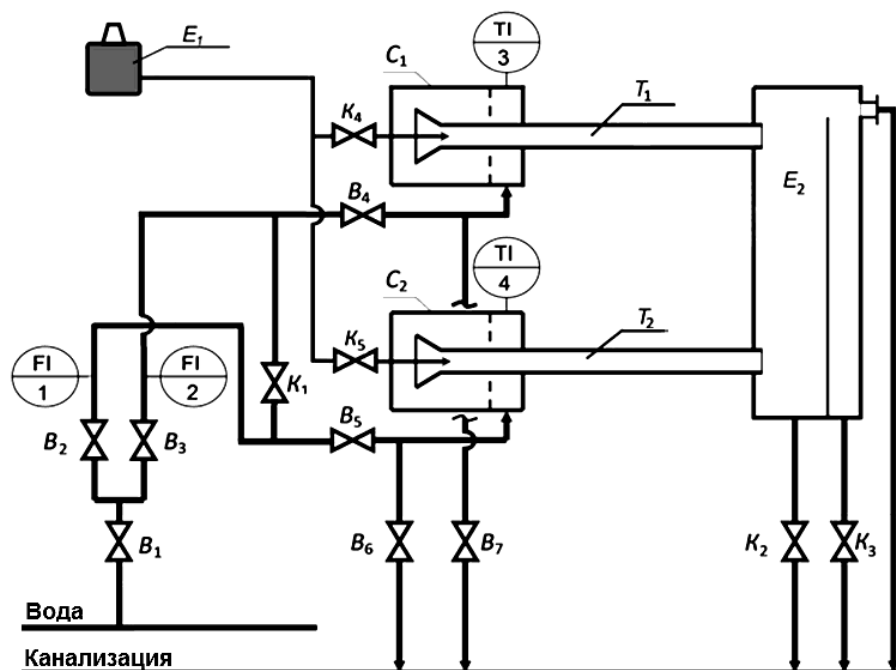


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки для изучения режимов течения жидкости [1]

Методика выполнения работы

Перед началом работы проверьте, полностью ли заполнены резервуары C_1 , C_2 и ёмкость E_2 водой (вода в ёмкости E_2 должна слегка переливаться через перегородку).

1. Проверьте: в течение работы краны K_1 и K_3 должны быть полностью открыты.

2. Закройте краны K_2 (2 шт.), K_4 , K_5 и вентили B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 , B_6 , B_7 .

3. Для проведения эксперимента (6–7 измерений) на трубе T_1 :

- откройте вентиль B_4 ;
- полностью откройте вентиль B_1 и слегка откройте вентиль B_2 на левом ротаметре (поз. 1), в трубу T_1 начнёт поступать вода;
- откройте кран K_4 на линии подачи индикатора в трубу T_1 . Расход

индикатора можно регулировать, чтобы четче видеть его след в движущейся жидкости (будьте осторожны – индикатор окрашивает, для защиты рук возьмите перчатки);

– в каждом следующем эксперименте следует увеличивать расход воды с помощью вентиля В₂ до максимального; затем, не закрывая В₂, открыть вентиль В₃, после чего закрыть В₂, и далее регулировать расход воды только вентилем В₃ по правому ротаметру (поз. 2);

– в каждом эксперименте необходимо показания ротаметра и описание движения индикатора внести в соответствующую графу табл. 1.1;

Таблица 1.1

Измеренные и рассчитанные величины

Труба	Измеренные величины					Расчёт		
	№	Показания ротаметров	Расход воды, $\dot{V}_{\text{ротам.}}$ л/мин	$T, ^\circ\text{C}$	Характер движения жидкости	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	Re
1								
2								

– определите расход воды, соответствующий переходу ламинарного режима течения в турбулентный, а также начало развитого турбулентного режима движения;

– сразу после окончания эксперимента на трубе Т₁ закройте кран К₄, чтобы остановить подачу индикатора, затем закройте В₃ и В₄;

– измерьте температуру воды.

4. Для проведения эксперимента (5–6 измерений) на трубе Т₂:

– проверьте уровень воды в емкостях С₁, С₂ и Е₂;

– откройте вентиль В₅;

– слегка откройте вентиль В₂ на левом ротаметре (поз. 1), в трубу Т₂ начнет поступать вода;

- откройте кран K_5 на линии подачи индикатора в поток воды;
- в каждом следующем эксперименте следует увеличивать расход воды с помощью вентиля B_2 до максимального значения по левому ротаметру (поз. 1);
- определите расход воды, соответствующий переходу ламинарного режима течения в турбулентный, а также начало развитого турбулентного режима движения;
- сразу после окончания эксперимента на трубе T_2 закройте кран K_5 , чтобы остановить подачу индикатора, затем закройте вентили B_1, B_2, B_5 .

5. После окончания работы откройте вентили B_6, B_7 для слива воды из установки.

6. В табл. 1.1 следует внести результаты эксперимента, температуру воды, подаваемой в установку.

Калибровочные графики ротаметров находятся рядом с установкой.

Обработка экспериментальных данных

1. Значение числа Рейнольдса для различных режимов рассчитайте по формуле (1.1), имея в виду, что

- для круглой трубы $d_s = d$;
- величины плотности ρ (кг/м^3) и коэффициента динамической вязкости μ ($\text{Па}\cdot\text{с}$) рабочей жидкости при рабочей температуре найдите в справочной литературе;
- среднюю скорость v жидкости в трубе получите из уравнения расхода:

$$v = \frac{\dot{V}}{S}, \quad (1.2)$$

где $\dot{V}$ – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; S – поперечное сечение потока, м^2 .

Значения $\dot{V}$ вычислите из показаний ротаметра $\dot{V}_{\text{ротам.}}$ по калибровочным графикам.

Результаты расчётов внесите в табл. 1.1.

По наблюдаемому характеру движения индикатора в первой и второй трубах определите точки перехода от ламинарного режима течения

воды к турбулентному, а также начало развитого турбулентного режима течения и соответствующие им значения числа Re .

Сравните общепринятые экспериментальные и полученные Вами значения критических чисел Рейнольдса. Сделайте выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие режимы движения наблюдают при течении жидкости? Как изменяется характер движения жидкостных частиц при переходе от одного режима к другому?
2. Физический смысл критерия Рейнольдса. Чему равно нижнее и верхнее критические числа Рейнольдса для труб круглого сечения?
3. От каких факторов зависит переход от одного режима течения к другому?
4. Дайте определение динамической и кинематической вязкости и укажите их единицы измерения.
5. Объясните принцип работы ротаметра.
6. Опишите эпюру скоростей при ламинарном и турбулентном режимах течения.
7. Каково соотношение между средней и максимальной скоростями при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости?
8. На что влияет внезапное или постепенное расширение или сужение потока?
9. Укажите формулы, по которым рассчитывается критерий Рейнольдса для круглой трубы и для потоков произвольного поперечного сечения.
10. Приведите уравнение, описывающее профиль скорости при ламинарном режиме течения в круглой трубе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБОПРОВОДА

В химической технологии осуществление многих процессов невозможно без перемещения жидкостей и газов через аппараты, соединённые между собой трубопроводами. Для перемещения капельных жидкостей применяют насосы, а для упругих жидкостей (газов и паров) – вентиляторы и газодувки.

При движении реальных жидкостей в трубопроводах удельная энергия потока по ходу движения убывает вследствие:

- трения жидкости о стенки и переноса импульса в поперечном направлении вследствие вязкости жидкости;
- преодоления так называемых местных сопротивлений, т.е. таких участков гидравлической сети, на которых происходит изменение скорости потока по величине и/или по направлению.

К местным сопротивлениям относятся вход в трубопровод и выход из него, сужения и расширения потока, отводы (повороты трубопровода), соединительные колена, тройники, диафрагмы и другие измерительные устройства, вентили, краны, задвижки и прочая запорно-регулирующая арматура.

Из-за потери энергии, которая необратимо теряется в виде тепловой энергии (диссипируется), в уравнении Бернулли для реальных жидкостей возникает так называемый потерянный напор $h_{\text{п}}$:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{\text{п}}, \quad (2.1)$$

где 1 и 2 – рассматриваемые по ходу движения поперечные сечения потока, z_1 и z_2 – средние нивелирные высоты сечений над произвольной горизонтальной плоскостью, м; p_1 и p_2 – средние давления в сечениях, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; v_1 и v_2 – средние скорости потока в сечениях, м/с; α_1 и α_2 – коэффициенты кинетической энергии, ρ – плотность жидкости, кг/м³; $h_{\text{п}}$ – потерянный напор, м (Дж/Н).

Потерянный напор складывается из сопротивления трения (или сопротивления по длине трубопровода L) и всех местных сопротивлений трубопровода:

$$h_{\Pi} = h_{\text{тр}} + h_{\text{м.с.}} \quad (2.2)$$

В инженерных расчётах принято потерянный напор выражать пропорционально удельной кинетической энергии потока – скоростному напору $\frac{v^2}{2g}$. Так, потери напора на трение описываются выражением:

$$h_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{L}{d_3} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.3)$$

где $\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления трения, или коэффициент потерь энергии по длине трубопровода (например, $\xi_{\text{тр}} = 5$ означает, что на преодоление сил трения по длине трубопровода затрачено пять скоростных напоров $\frac{v^2}{2g}$), λ – коэффициент гидравлического трения, d_3 – эквивалентный диаметр, равный для трубы круглого сечения её внутреннему диаметру.

Потери напора на местные сопротивления:

$$h_{\text{м.с.}} = (\xi_{\text{м.с.1}} + \xi_{\text{м.с.2}} + \dots + \xi_{\text{м.с.n}}) \frac{v^2}{2g} = \sum_1^n \xi_{\text{м.с.}} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.4)$$

где $\xi_{\text{м.с.}}$ – коэффициент местного сопротивления, показывающий, сколько скоростных напоров теряется при преодолении жидкостью местного сопротивления.

Таким образом, потерянный напор:

$$h_{\Pi} = (\xi_{\text{тр}} + \Sigma \xi_{\text{м.с.}}) \frac{v^2}{2g} = \left(\lambda \frac{L}{d_3} + \Sigma \xi_{\text{м.с.}} \right) \frac{v^2}{2g}, \quad (2.5)$$

а потеря давления в трубопроводе:

$$\Delta p_{\Pi} = \rho g h_{\Pi} = \left(\lambda \frac{L}{d_3} + \Sigma \xi_{\text{м.с.}} \right) \frac{\rho v^2}{2}. \quad (2.6)$$

Для расчёта коэффициента гидравлического трения в исследуемом

стеклянном трубопроводе можно использовать формулу Блазиуса для гидравлически гладких труб (применима в диапазоне $Re = 4000 \div 100\,000$):

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (2.7)$$

Перепады давления, возникающие при движении жидкости через местное сопротивление или прямой участок трубы, определяют по показаниям U-образных дифференциальных манометров, соединённых трубками с точками до и после соответствующего участка гидравлической сети:

$$\Delta p = (\rho_m - \rho) g h_{\text{ман}}. \quad (2.8)$$

где ρ_m и ρ – плотности манометрической жидкости и жидкости в трубопроводе, соответственно, кг/м^3 ; $h_{\text{ман}}$ – разность уровней столба манометрической жидкости в коленах дифманометра, м;

Объёмный расход жидкости в $\text{м}^3/\text{с}$ обычно находят по показаниям дифманометра, присоединённого к измерительной диафрагме $h_{\text{ман диафр.}}$:

$$\dot{V} = \alpha \frac{\pi d_o^2}{4} \sqrt{2 g h_{\text{ман диафр.}} \frac{\rho_m - \rho}{\rho}}, \quad (2.9)$$

где α – коэффициент расхода диафрагмы, который в данной работе следует определять экспериментально, используя показания ротаметра; $h_{\text{ман диафр.}}$ – разность уровней столба манометрической жидкости в коленах подключённого к диафрагме дифманометра, м.

Средняя скорость жидкости определяется по уравнению расхода:

$$v = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2}, \quad (2.10)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Напор насоса, перекачивающего воду по стеклянному трубопроводу, рассчитывается по показаниям манометра и вакуумметра:

$$H = \frac{p_{\text{ман}} + p_{\text{вак}}}{\rho g} + h_0, \quad (2.11)$$

где $p_{\text{ман}}$ и $p_{\text{вак}}$ – показания манометра и вакуумметра, соответственно, Па;

h_0 – расстояние по вертикали от точки присоединения вакуумметра до центра манометра, м.

Цель работы: экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений, коэффициента расхода диафрагмы и коэффициента гидравлического трения; сравнение экспериментально определённых и справочных значений коэффициентов; оценка потеряннного напора; ориентировочное определение рабочей точки.

Описание установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.1.

Вода из ёмкости Е двухступенчатым центробежным насосом Н марки PEDROLLO 2 CP_m 25/130N мощностью 0,75 кВт и максимальной производительностью 42 м³/ч подаётся в стеклянный трубопровод, пройдя который она возвращается в ёмкость Е. На напорной линии насоса установлен регулирующий вентиль ВР₁, ротаметр Р_Т и манометр (поз. 2), на всасывающей линии – вакуумметр (поз. 1). Насос также снабжён байпасной (обводной) линией с регулирующим вентилем ВР₂. Участок напорной линии, на котором расположены вентиль ВР₁ и ротаметр Р_Т, имеет меньший внутренний диаметр, чем стеклянный трубопровод, в связи с чем этот участок снабжён точками подключения к U-образному дифференциальному манометру, заполненному ртутью с $\rho_m = 13600$ кг/м³ (поз. 3).

На стеклянном трубопроводе имеются следующие местные сопротивления, соединённые трубками с U-образными дифманометрами, заполненными подкрашенным четырёххлористым углеродом с $\rho_m = 1590$ кг/м³: 1) Кос – косой участок трубопровода под прямоточный вентиль с наклонным шпинделем (косва) (поз. 4), 2) ВН – вентиль нормальный (поз. 6), 3) С – сужение (изменение внутреннего диаметра от 45 до 35 мм), 4) Кол – колено с поворотом под углом 90° трубопровода внутренним диаметром 35 мм [2]. Кроме того, между элементами Кос и ВН имеется прямой участок ПУ, соединённый с U-образным дифманометром также заполненным подкрашенным четырёххлористым углеродом (поз. 5). С помощью трёхходовых кранов КТ₁ и КТ₂ прямой участок (ПУ) подключается к дифмано-

метру при определении коэффициента гидравлического трения λ в стеклянном трубопроводе. Длина участка ПУ 3 м. Далее по ходу движения воды установлена измерительная диафрагма Д с диаметром отверстия 30 мм, снабженная U-образным дифманометром, заполненным ртутью.

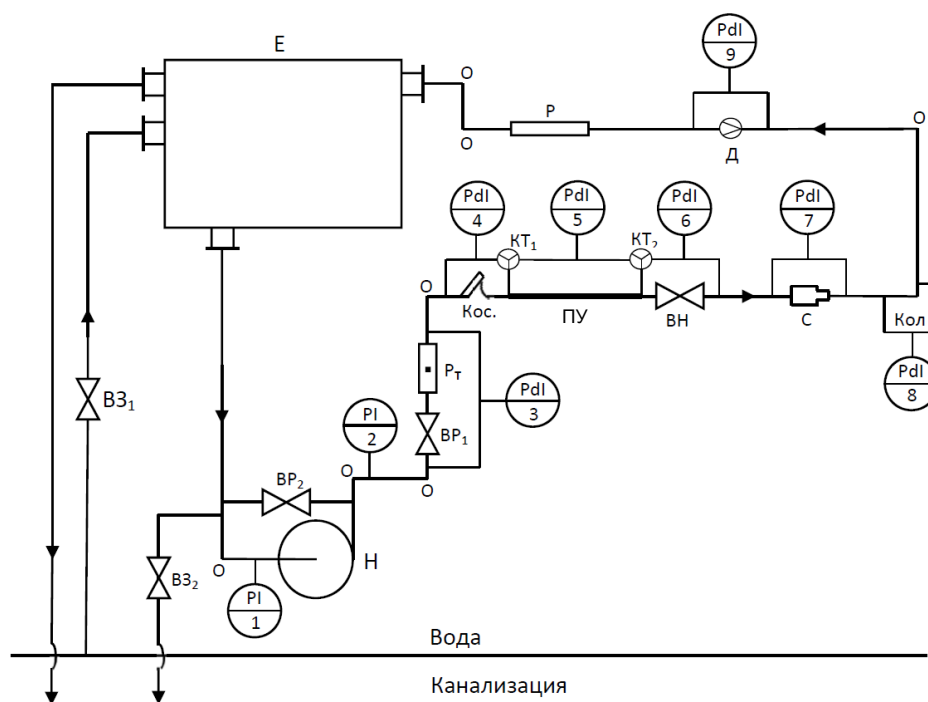


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки

Е – ёмкость, Н – насос, ВР₁, ВР₂ – вентили регулирующие, Р_Т – ротаметр, Кос – косой участок под прямоточный вентиль (косва), КТ₁, КТ₂ – краны трёхходовые, ПУ – прямой участок, ВН – вентиль нормальный, С – сужение, Кол – колесо, Д – диафрагма, Р – расширенный участок, ВЗ₁, ВЗ₂ – вентили запорные, О – отводы (повороты трубы)

Кроме перечисленных участков, на гидравлической сети имеются и другие местные сопротивления, которые необходимо учитывать при оценке всего потерянного в данной сети напора: 1) расширение Р стеклянного трубопровода до диаметра 112 мм длиной 1,85 м с последующим сужением до 56 мм; 2) четыре отвода (поворота) стеклянной трубы О с отношением радиуса изгиба к внутреннему диаметру $R_0/d = 2$; 3) вход в трубу (с острыми

ми краями) из ёмкости Е и выход из трубы в ёмкость Е; 4) участок новой оцинкованной трубы с внутренним диаметром 50 мм и шероховатостью стенок 0,2 мм и общей длиной 2,85 м; 5) пять отводов (поворотов) оцинкованной трубы с $R_0/d = 1,5$.

Сопротивления этих элементов и участки трубопровода с потерей энергии на трение рассчитывают по справочным данным (например, табл. XIII и рис. 1.5 в [3]).

Ёмкость Е имеет возможность заполнения с помощью запорного вентиля ВЗ₁. Заполнение ёмкости контролируется по водомерному стеклу. Опорожнение ёмкости Е осуществляется через запорный вентиль ВЗ₂. Во избежание переполнения ёмкости Е на ней имеется верхняя переливная труба, соединённая с линией канализации.

Расстояние по вертикали между точками присоединения вакуумметра и манометра равно 0,3 м. Общая длина стеклянного трубопровода с внутренним диаметром 56 мм (за исключением расширенного участка Р длиной 1,85 м и прямого участка ПУ длиной 3 м) составляет 13,7 м.

Методика выполнения работы

Опыты проводятся только в присутствии учебного мастера или преподавателя.

Перед каждым опытом необходимо убедиться в заполнении ёмкости Е по водомерному стеклу. Для заполнения ёмкости Е нужно открыть вентиль ВЗ₁.

Перед включением насоса Н следует отметить исходные уровни манометрической жидкости в U-образных дифманометрах (поз. 4–9).

Полностью закройте вентиль ВЗ₂ на байпасной линии и полностью откройте вентиль ВР₁ на нагнетательной линии насоса.

Включите насос и при максимальной его производительности отметьте разность уровней манометрической жидкости $h_{\text{ман}}$ и $h_{\text{ман диафр.}}$ в коленах U-образных дифманометров (поз. 4, 6–9), измеряющих перепады давления Р_Т и ВР₁, Кос, ВН, С, Кол, Д, а также показание ротаметра Р_Т.

Выключите насос и с помощью трёхходовых кранов КТ₁ и КТ₂ подключите к дифманометру (поз. 5) прямой участок ПУ. Включите насос и

отметьте разность уровней в коленях дифманометра, соединённых с прямым участком ПУ.

Уменьшая производительность насоса вентилями ВР₁ и ВР₂, следует сделать 2–3 опыта.

Результаты измерений заносятся в табл. 2.1.

Обработка экспериментальных данных

В каждом из опытов определяют объёмный расход жидкости $\dot{V}$ по показаниям ротаметра Р_Т, среднюю скорость v по формуле (2.10), число Рейнольдса $Re = \frac{v d \rho}{\mu}$, коэффициенты местного сопротивления $\xi_{м.с.}$ по формуле (2.4), коэффициент гидравлического трения λ по формуле (2.3), напор насоса H по формуле (2.11), коэффициент расхода диафрагмы α по уравнению (2.9), подставляя в него объёмный расход, определённый по ротаметру. Экспериментально определённые коэффициенты местных сопротивлений $\xi_{м.с.}$ и коэффициент гидравлического трения λ необходимо сопоставить с их справочными значениями.

Результаты расчётов сводят в табл. 2.2. На основании результатов расчётов, представленных в таблице 2.2., делают выводы по проделанной работе.

По заданию преподавателя возможно построение насосной и сетевой характеристик, определение в точке их пересечения максимальной производительности насоса при работе его на данный стеклянный трубопровод и сравнение её с экспериментально определённой производительностью.

Паспортная напорная характеристика насоса приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Паспортная напорная характеристика насоса PEDROLLO 2 CPm 25/130 N

Производительность $\dot{V}$, л/мин	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Напор H , м вод. ст.	42	39	37	34	31	28,5	25,5	22	18	15

Таблица 2.1

Результаты измерений

№ опыта	Показания ротаметра P_T , л/мин	$h_{\text{ман. дифр.}}$, мм рт. ст.	Местные сопротивления					Сопротивление трения $h_{\text{тр}}$, мм ст. CCl_4	Показание манометра p_M , МПа	Показание вакуумметра p_B , МПа
			h_{P+BP_1} , мм рт. ст.	$h_{\text{кос}}$, мм ст. CCl_4	$h_{\text{вн}}$, мм ст. CCl_4	h_C , мм ст. CCl_4	$h_{\text{кол}}$, мм ст. CCl_4			
1										
2										
3										
4										

Таблица 2.2

Результаты расчётов

№ опыта		1	2	3	4
$\Delta p_{\text{ман. диафр.}}$, мм рт. ст.					
Объёмный расход $\dot{V}$, м³/с					
Число Рейнольдса Re (при $d = 56$ мм)					
Коэф. расхода диа- фрагмы α	Справочн. знач.				
	Эксп. значения				
Местные сопротивления	$\zeta_{\text{Кос}}$	Справочн. знач.			
		Эксп. значения			
	$\zeta_{\text{ВН}}$	Справочн. знач.			
		Эксп. значения			
	$\zeta_{\text{С}}$	Справочн. знач.			
		Эксп. значения			
	$\zeta_{\text{Кол}}$	Справочн. знач.			
		Эксп. значения			
Скорость v , м/с					
Сопротивление сети h , м вод. ст.					
Напор насоса H , м вод. ст.					
Паспортный напор насоса H , м вод. ст.					

Контрольные вопросы

1. Что понимают в гидродинамике под реальной и идеальной жидкостью?
2. В чём принципиальное различие в понятиях «идеальный газ» в термодинамике и «идеальная жидкость» в гидродинамике?
3. На какие два вида подразделяют реальные жидкости?
4. Какую величину называют геометрическим напором?
5. Какую величину называют гидростатическим (пьезометрическим) напором? Какой физический смысл имеют геометрический и пьезометрический напоры?
6. Запишите уравнение Бернулли применительно к двум произвольным поперечным сечениям потока реальной каплевой жидкости в трубопроводе. Каковы размерность и физический смысл каждого из членов уравнения Бернулли?
7. На компенсацию каких потерь затрачивается энергия при течении жидкостей по трубопроводам? В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?
8. Для какой цели на трубопроводе используется диафрагма?
9. Для чего служат дифманометры?
10. Почему в качестве манометрических жидкостей в дифманометрах используют не только воду, но и другие жидкости?
11. Что понимают под местным сопротивлением?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ИЗУЧЕНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТЕЙ В СЕЧЕНИИ ТРУБОПРОВОДА

Информация о распределении скоростей в поперечном сечении потока является необходимой при расчете теплообменных, массообменных и реакционных процессов. Причиной неравномерности скоростей в движущемся по трубопроводу потоке жидкости или газа является трение о стенки трубы. Для примера рассмотрим стационарное ламинарное течение. Если вход в трубу из резервуара выполнен достаточно плавно, то в начальном сечении $A-A$ устанавливается практически равномерное распределение скоростей (рис. 3.1).

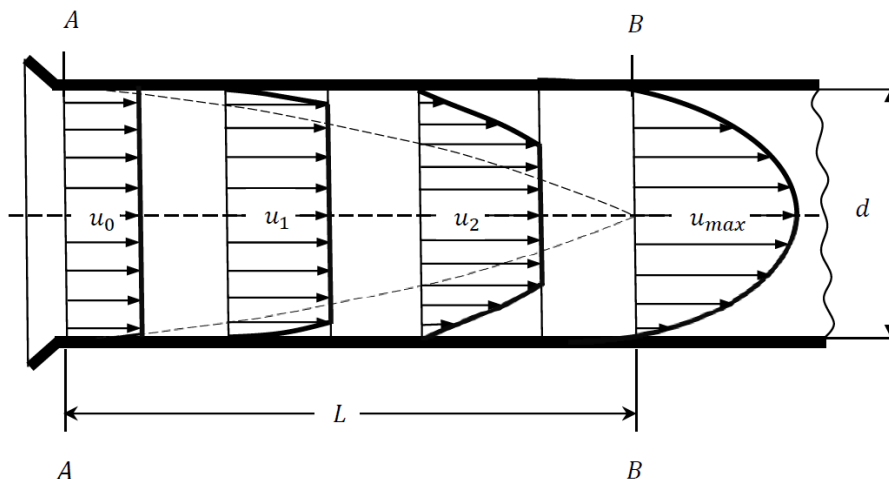


Рис. 3.1 Развитие параболического профиля скоростей в круглой трубе:

$$u_0 < u_1 < u_2 < u_{max}; u_0 = v; u_{max} = 2 \cdot v$$

По мере удаления от входа в трубу, вследствие тормозящего влияния стенки, скорость газа или жидкости у стенки становится меньше. На непроницаемой стенке, как известно, скорость обращается в ноль. Чтобы закон сохранения массы соблюдался, уменьшение расхода у стенок должно компенсироваться его увеличением в центральной части потока. Таким образом, в потоке формируется профиль скоростей. В случае ламинарного

потока на некотором участке L , называемым начальным или входным, поток имеет центральную часть, где сохраняется равномерное распределение скоростей, и пристенный (пограничный) слой, где скорости распределяются неравномерно. Сечение центральной части вперёд по течению убывает, а толщина пограничного слоя возрастает. В конце входного участка (сечение $B - B$) пограничный слой смыкается на оси круглой трубы и ниже устанавливается параболическое распределение скоростей:

$$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (3.1)$$

где r – текущее значение радиуса потока ($0 \leq r \leq R$); R – внутренний радиус трубы.

Соотношение (3.1) описывает профиль скоростей в поперечном сечении трубопровода и представляет собой уравнение параболы. Однако нужно помнить, что на самом деле распределение скоростей является объёмной фигурой и при ламинарном режиме движения в круглой трубе представляет собой параболоид вращения, а уравнение (3.1) записано для любого продольного сечения этого параболоида плоскостью, проходящей через ось трубы.

Длину участка гидродинамической стабилизации L при ламинарном течении можно приблизительно оценить по соотношению:

$$L = 0,0575 \cdot d \cdot \text{Re}, \quad (3.2)$$

где d – внутренний диаметр трубы, $\text{Re} = \frac{v d \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса, составленное для средней скорости потока v .

Как известно, для ламинарного потока в круглой трубе имеем:

$$v = 0,5 u_{\max}. \quad (3.3)$$

При турбулентном режиме из-за хаотического движения частиц (макропереноса импульса) происходит выравнивание скоростей в основной массе потока и их распределение по сечению трубы характеризуется кривой, отличающейся по форме от параболы. Мгновенная скорость частиц здесь беспорядочно изменяется во времени как по величине, так и по

направлению. Вследствие того, что скорости пульсируют около некоторого осреднённого во времени значения, вместо переменных во времени мгновенных величин используют значение этих скоростей, определённое за некоторый промежуток времени от 0 до t . В этом случае местную скорость можно представить в виде соотношения:

$$\bar{u}_x = \frac{1}{t} \int_0^t u_x dt. \quad (3.4)$$

Несмотря на кажущуюся беспорядочность изменения скоростей при турбулентном движении, значение осреднённой скорости $\bar{u}_x$ за достаточно большой промежуток времени t остаётся постоянным. При этом достаточно большим может считаться уже период времени, измеряемый секундами или даже долями секунды, так как частота пульсаций скорости очень велика. Поэтому вместо изменения по сечению трубопровода мгновенных (истинных) скоростей u_x (как в случае ламинарного потока) можно рассматривать независимое от времени изменение осреднённых скоростей $\bar{u}_x$. В этом смысле турбулентное течение может рассматриваться как квазистационарное.

Для развитого турбулентного потока отношение средней скорости v к максимальной $u_{\max}$ является функцией числа Рейнольдса $\frac{v}{u_{\max}} = f(\text{Re})$ и обычно имеет значение 0,8–0,9. Необходимо отметить, что это справедливо для сечения стабилизированного потока, т.е. на участке, удалённом от входа не менее чем на 50 диаметров трубы. Развитие турбулентного потока отличается от развития ламинарного. На начальном участке в турбулентном потоке происходит последовательный переход от ламинарного к турбулентному пограничному слою, а в развитом турбулентном потоке непосредственно у стенки трубы существует тонкий ламинарный подслой.

Цель работы: экспериментальное определение локальных скоростей в сечении трубопровода, построение профиля (эпюры) локальных скоростей, вычисление средней скорости и расхода воздуха.

Описание установки

Для измерения локальной скорости в данной лабораторной работе использовано устройство, называемое трубкой Пито (рис. 3.2).

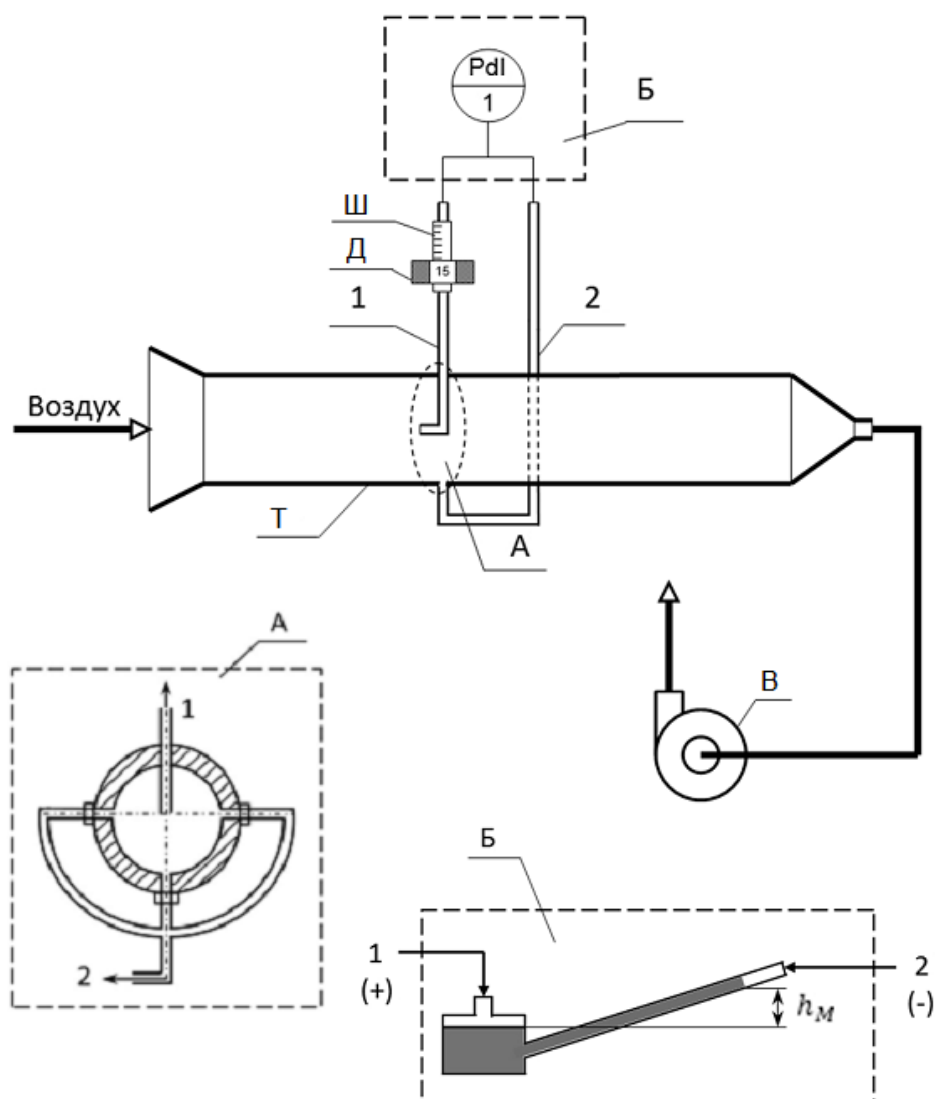


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки для определения профиля скоростей в сечении круглой трубы [4]:

1 – трубка Пито, 2 – трубка статического давления,

Т – труба, Ш – шток, Д – диск, В – воздуходувка, Б – микроманометр

Тонкая трубка 1 (трубка Пито) воспринимает полное давление потока (динамическое и статическое), а трубка 2 – только статическое. Разность этих двух давлений Δp_i эквивалентна динамическому давлению потока в том месте сечения, где находится трубка 1:

$$\Delta p_i = \frac{\rho u_i^2}{2}, \quad (3.5)$$

где ρ – плотность среды в трубопроводе (в данном случае воздуха), кг/м³; u_i – локальная скорость потока в точке измерения, м/с.

Возникающая разность давлений определяется дифференциальным манометром:

$$\Delta p_i = (\rho_M - \rho) g h_{Mi}, \quad (3.6)$$

где ρ_M – плотность манометрической жидкости, кг/м³; h_{Mi} – высота столба манометрической жидкости (показание дифманометра), м.

Таким образом, из соотношений (3.5) и (3.6) определяют локальную скорость потока $u_{\max}$ (в том месте, где находится трубка 1):

$$u_i = \sqrt{2 g h_{Mi} \frac{\rho_M - \rho}{\rho}} \quad (3.7)$$

Основным элементом установки является стеклянная труба Т длиной 2 м, имеющая на измерительном участке внутренний диаметр 50 мм. Через трубу вентилятором В протягивается воздух из лабораторного помещения. В измерительном сечении трубы Т в её стенке имеется 3 отверстия, через которые осреднённое значение статического давления выводится на трубку 2 (вид А на рис. 3.2). На верхней кромке трубы Т в измерительном сечении расположено специальное устройство, позволяющее измерять динамическое давление в разных точках сечения трубы. Устройство включает в себя резьбовой шток Ш, с которым жёстко связана трубка 1 и диск Д, при вращении которого шток перемещается вверх или вниз. На поверхность штока нанесена шкала, отградуированная в миллиметрах.

При установке штока в «нулевое» положение (по отметке на шкале) отверстие трубки 1 совмещается с осью трубы Т; при установке штока в

положение, соответствующее показанию «25 мм» на его шкале, трубка 1 размещается у стенки трубы.

Для того чтобы точнее определить местоположение датчика, диск Д имеет лыски (плоские срезы боковой поверхности), на которые нанесены условные метки «0», «5», «10» и «15». Один полный оборот диска перемещает шток (а вместе с ним и трубку Пито) на 1 мм.

Разность давлений в трубках 1 и 2 измеряется дифференциальным манометром. В данном случае используется микроманометр (вид Б на рис. 3.2). Чувствительность прибора увеличена за счёт трубки, установленной под углом 30° к чашке. Несмотря на то, что микроманометр заполнен спиртом, шкала прибора отградуирована в мм. вод. ст., поэтому плотность манометрической жидкости $\rho_m = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Методика выполнения работы [4, 5]

1. Установите трубку Пито 1 (рис. 3.2) в исходное положение, при котором открытый конец трубки совмещается с осью канала ($r_i = 0$).
2. Включите воздуходувку В, отметьте показание микроманометра Б.
3. Переместите трубку Пито 1 в иное требуемое положение (рекомендуемые местоположения трубки указаны в табл. 3.1, приведённой ниже) и зафиксируйте соответствующее показание микроманометра.
4. Завершив измерения, выключите вентилятор.

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитайте локальные скорости потока по формуле (3.7). Необходимое для расчёта по этой формуле значение плотности воздуха можно найти в справочниках или рассчитать по уравнению Менделеева–Клапейрона.
2. Используя рассчитанные значения постройте график (эпюру) распределения скоростей в сечении трубы. Поскольку профиль скоростей симметричен относительно оси трубы, вторую ветвь эпюры можно построить, как зеркальное отражение первой.
3. Рассчитайте среднюю скорость потока.

Средняя скорость потока определяется выражением:

$$v = \frac{1}{S} \int_S u_i dS. \quad (3.8)$$

С учётом того, что площадь круга радиусом R равна $S = \pi R^2$, а $dS = 2\pi r dr$, можно записать:

$$v = \frac{2}{R^2} \int_{r_i=0}^{r_i=R} u_i r_i dr_i. \quad (3.9)$$

Этот интеграл можно взять численно, например, методом трапеций. Однако более наглядным будет следующий способ. Как уже отмечалось, распределение скоростей в трубе круглого сечения для ламинарного режима представляет собой параболоид вращения (рис. 3.3, а). При турбулентном режиме параболическое распределение искажается, однако при любых режимах распределение скоростей остаётся объёмной фигурой. Средняя скорость потока при этом может быть найдена как отношение объёма этой фигуры к площади сечения трубы.

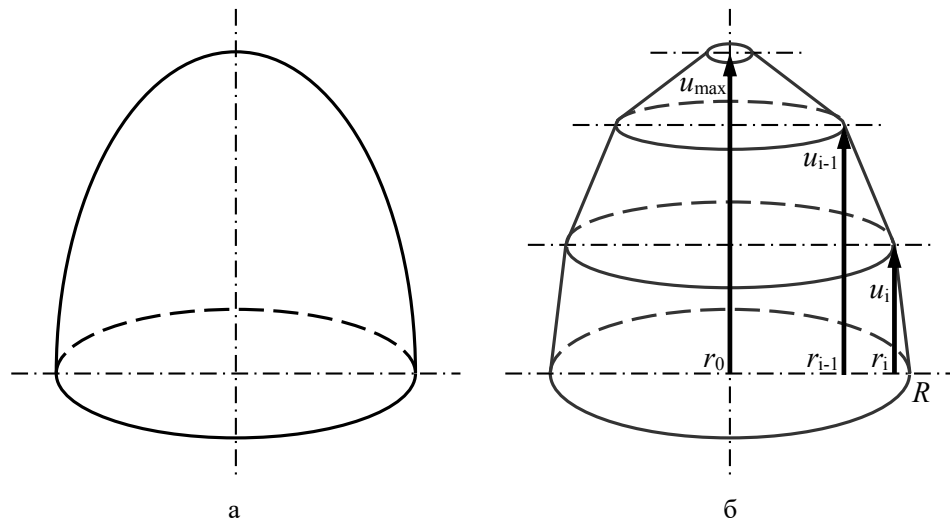


Рис. 3.3. Распределение скоростей:

а – в виде параболоида вращения, б – в виде набора усечённых конусов

Для нахождения объёма «искажённого» параболоида вращения разбейте его на усечённые конусы (рис. 3.3, б), высота каждого из которых равна разности локальных скоростей для данного и следующего замеров $u_{i-1} - u_i$, а радиусы оснований r_{i-1} и r_i , соответственно. Объём каждого усечённого конуса найдите по формуле:

$$V_i = \frac{1}{3} \pi (u_{i-1} - u_i) (r_{i-1}^2 + r_{i-1} \cdot r_i + r_i^2). \quad (3.10)$$

Значение средней скорости рассчитайте по соотношению:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^{10} V_i}{S}. \quad (3.11)$$

Измеренные и вычисленные значения параметров следует занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Измеренные величины и результаты расчёта

i	r_i , мм	h_i , мм	u_i , м/с	V_i
0	0		$u_0 = u_{\max}$	—
1	5			
2	10			
3	15			
4	17			
5	19			
6	21			
7	22			
8	23			
9	24			
10	25	$h_{10} = 0$	$u_{10} = 0$	

4. Рассчитайте число Рейнольдса, соответствующее средней скорости потока, а также соотношение между средней и максимальной скоростями. Постройте эпюру скоростей в виде $\frac{u_i}{u_{\max}} = f\left(\frac{r_i}{R}\right)$ и сопоставьте её с аналогично построенным параболическим распределением скоростей (см. п. 2). Определите объёмный и массовый расходы воздуха

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой полное, статическое и динамическое давления в данной точке потока?
2. Что такое «участок гидродинамической стабилизации потока»? Как рассчитывается его длина при ламинарном течении?
3. В чём отличие местной (локальной), истинной (мгновенной) и средней скоростей?
4. Какое уравнение описывает профиль скоростей по сечению потока при ламинарном режиме?
5. Изобразите профиль скоростей при турбулентном течении. В чём его отличие от профиля при ламинарном течении?
6. Какими преимуществами обладает микроанометр по сравнению с обычным дифманометром? Как нужно подключить микроанометр, чтобы измерить величины полного, динамического и статического напоров?
7. Каково отношение средней скорости к максимальной при ламинарном и при турбулентном режимах? Чем вызваны эти различия?
8. Какие существуют приборы для измерения объёмного расхода и средней скорости газа и жидкости?
9. Каково устройство трубки Пито?
10. Соотношение каких сил характеризует критерий Рейнольдса?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Для перемещения различных жидкостей в химической промышленности широко используются центробежные насосы. В этих насосах всасывание и нагнетание осуществляется непрерывно и равномерно под действием центробежной силы инерции, возникающей при вращении рабочего колеса с лопатками, расположенного в улиткообразном корпусе.

На рис. 4.1 показана схема одноступенчатого центробежного насоса.

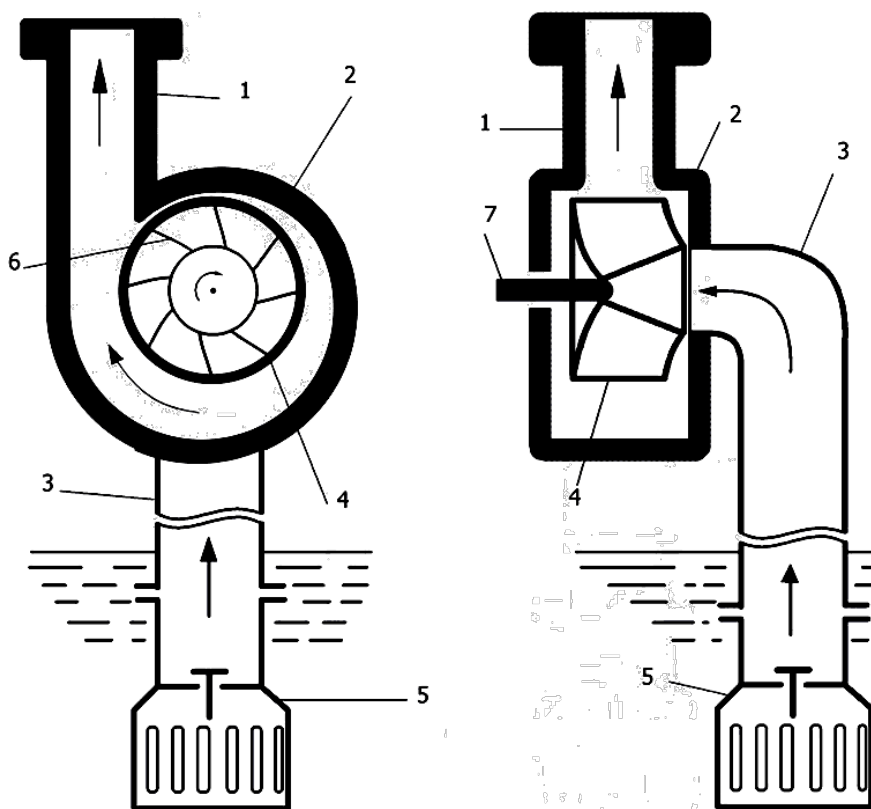


Рис. 4.1. Схема одноступенчатого центробежного насоса:

- 1 – нагнетательный патрубок; 2 – корпус; 3 – всасывающий патрубок;
4 – рабочее колесо; 5 – клапан с сеткой; 6 – лопатки колеса; 7 – вал

Основным рабочим элементом центробежного насоса является рабочее колесо 4 с лопатками 6, помещённое на валу 7 внутри неподвижного корпуса 2 спиралевидной формы. Рабочее колесо состоит из двух дисков: переднего и заднего. Между дисками находятся лопатки 6. Корпус насоса соединен патрубками с трубопроводами – всасывающим 3 и нагнетательным 1. На всасывающем трубопроводе размещён клапан с сеткой 5, предохраняющий насос от опорожнения при остановках.

Основными параметрами работы насосов являются: производительность – $\dot{V}$, напор – H , потребляемая мощность – N_e , коэффициент полезного действия (КПД) – η_n . Все эти параметры работы центробежного насоса зависят от числа оборотов рабочего колеса – n . При постоянном числе оборотов ($n = \text{const}$) значения H , N_e , η_n зависят только от производительности. Производительность $\dot{V}$ регулируется степенью открытия вентиля на напорной линии насоса (нагнетательном трубопроводе). Графические зависимости параметров H , N_e , η_n от производительности $\dot{V}$ при постоянном числе оборотов рабочего колеса насоса называют рабочими характеристиками (рис. 4.2).

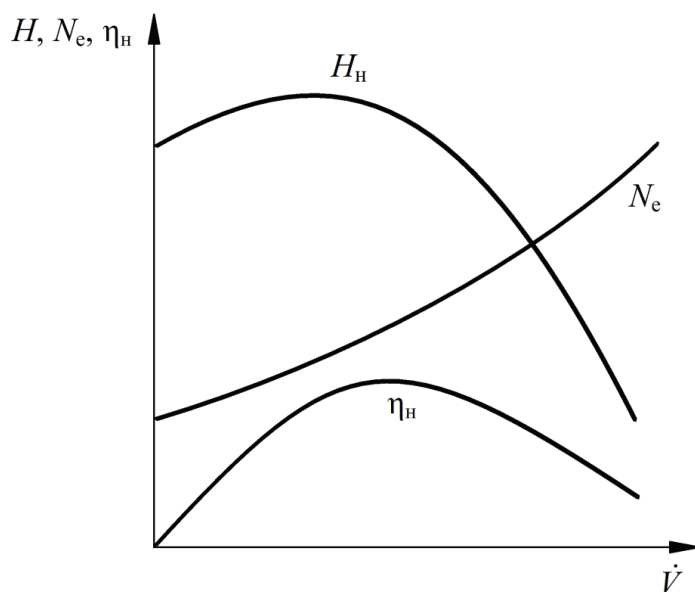


Рис. 4.2. Рабочие характеристики центробежного насоса, полученные экспериментально при постоянном числе оборотов рабочего колеса ($n = \text{const}$)

Рабочие характеристики получают при испытании центробежного насоса при постоянном числе оборотов рабочего колеса n , изменяя производительность насоса от нуля до максимальной при помощи вентиля на нагнетательном трубопроводе.

Располагая рабочими характеристиками насоса, можно выбрать наиболее благоприятный режим его эксплуатации, т.е. режим, обеспечивающий максимальный коэффициент полезного действия η_n .

При изменении числа оборотов рабочего колеса n в некоторых пределах (не более чем в 2 раза) изменение производительности, напора и полезной мощности с точностью, необходимой при технических расчетах можно определять согласно законам пропорциональности:

$$\frac{n_2}{n_1} < 2, \quad \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \quad \frac{N_{e2}}{N_{e1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3.$$

Если давление во всасывающем трубопроводе насоса измеряется вакуумметром, а давление в нагнетательном трубопроводе насоса измеряется манометром и при этом точки подсоединения этих приборов к гидравлической системе находятся в непосредственной близости от самого насоса (например, «точка 1» – у всасывающего патрубка, а «точка 2» – у нагнетательного), то искомый напор определяется по формуле:

$$H = \frac{p_{\text{ман}} + p_{\text{вак}}}{\rho g} + \frac{v_n^2 - v_{\text{вс}}^2}{2g} + h_0, \quad (4.1)$$

где $p_{\text{ман}}$ – избыточное давление в нагнетательном патрубке насоса (по показаниям манометра); $p_{\text{вак}}$ – разрежение во всасывающем патрубке (по показаниям вакуумметра); v_n и $v_{\text{вс}}$ – скорости в линии нагнетания и всасывания, соответственно; h_0 – расстояние по вертикали от точки присоединения вакуумметра до центра манометра.

Полезная мощность, или энергия, сообщённая насосом перекачиваемой жидкости за единицу времени вычисляется по формуле:

$$N_{\text{пол}} = \dot{V} \rho g H. \quad (4.2)$$

Коэффициент полезного действия насоса определяется выражением:

$$\eta_n = \frac{N_{\text{пол}}}{N_e}, \quad (4.3)$$

где N_e – мощность на валу насоса.

Коэффициент полезного действия всей насосной установки определяется как произведение:

$$\eta_{\text{уст}} = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}} \eta_n, \quad (4.4)$$

где $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя; $\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи; η_n – КПД насоса.

КПД насосной установки определяется также как отношение полезной мощности $N_{\text{пол}}$ к мощности потребляемой из электрической сети $N_{\text{дв}}$:

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{дв}}}. \quad (4.5)$$

Насос 1

Цель работы: практическое ознакомление с насосной установкой, определение опытным путём рабочих характеристик центробежного насоса (зависимости напора, коэффициента полезного действия, потребляемой мощности от производительности насоса).

Описание установки

Вид и схема лабораторной установки изображены на рис. 4.3 и 4.4.

Основным элементом лабораторной установки является двухступенчатый центробежный насос Н, рабочее колесо которого приводится во вращение электродвигателем переменного тока ЭД номинальной мощностью 1,25 кВт.

Рабочая жидкость (вода) – перекачивается насосом из резервуара Р, расположенного ниже уровня пола, в ёмкость E_1 по трубопроводу, состоящему из линии всасывания и линии нагнетания, размер которых одинаков и составляет $\varnothing 32 \times 5$ мм (рис. 4.4). Линия всасывания оборудована обратным клапаном К, предотвращающим сток жидкости из неработающего насоса в резервуар Р.

На линии всасывания установлен вакуумметр (поз. 1 на рис. 4.3 и 4.4); на линии нагнетания установлен манометр (поз. 2 на рис. 4.3 и 4.4). Потребляемая из сети электрическая мощность измеряется ваттметром (расположен на стене).

Расход перекачиваемой жидкости регулируется вентилем V_1 (рис. 4.3 и 4.4).

Для измерения расхода воды установка оборудована ротаметром P_T , а приёмная ёмкость E_1 снабжена водомерным стеклом (поз. 3 на рис. 4.4) с отградуированной шкалой.

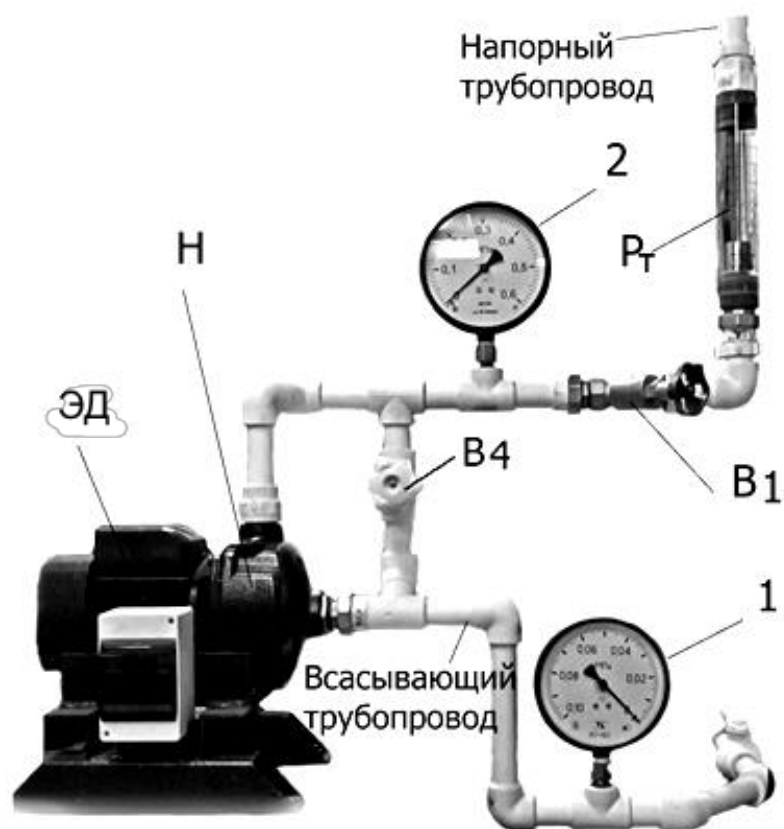


Рис. 4.3. Лабораторная установка (насос 1):

1 – вакуумметр; 2 – манометр; Н – насос; ЭД – электродвигатель;
 P_T – ротаметр; V_1 , V_4 – вентили на нагнетательном
и всасывающем трубопроводе соответственно

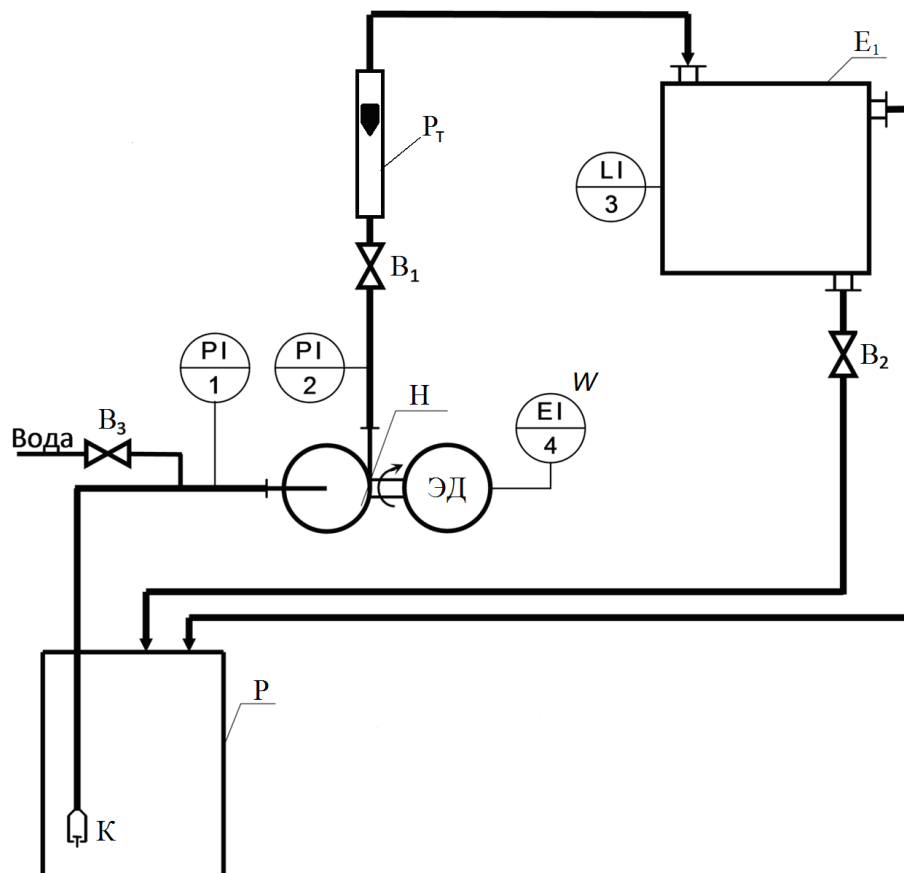


Рис. 4.4. Схема лабораторной установки для определения характеристик центробежного насоса 1 при $n = 2900$ об/мин [5]:

Н – насос; ЭД – электродвигатель; Р – резервуар; E_1 – ёмкость;
К – клапан; P_T – ротаметр; $B_1, B_2; B_3$ – вентили регулировочные

Во избежание переполнения ёмкость E_1 оборудована линией перелива воды обратно в резервуар Р. Слив воды из заполненной ёмкости E_1 осуществляется также в резервуар Р.

Методика выполнения работы

Нормальное испытание насосной установки проводится в следующем порядке: определяются значения H , N_e , η_n в зависимости от подачи

насоса $\dot{V}$ при заданном постоянном числе оборотов рабочего колеса. Изменение подачи $\dot{V}$ осуществляется с помощью вентиля B_1 на нагнетательном трубопроводе (рис. 4.3, 4.4). Первое наблюдение проводят при полностью закрытом вентиле B_1 , а дальнейшие измерения – при постепенном открытии вентиля B_1 (вентиль B_4 всегда должен быть закрыт).

Результаты измерений необходимо внести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Измеренные величины (насос 1)

№	Объём воды по водомерному стеклу, V , л	Время t , с	Показания ротаметра, $\dot{V}_{\text{рот.}}$, л/мин	Показания манометра $p_{\text{ман}}$, МПа	Показания вакуумметра $p_{\text{вак}}$, МПа	Показания ваттметра $N_{\text{дв}}$, Вт
1						
2						
3						
4						
5						
6						

1. Перед началом работы слейте воду из ёмкости E_1 , открыв сливной вентиль B_2 .

2. Закройте вентили B_1 (на напорной линии) и B_2 (сливной)

3. Кнопкой автоматического пускателя включите электропитание (насос заполнения не требует, так как жидкость в нём удерживается обратным клапаном на всасывающей линии).

4. Снимите показания ваттметра, манометра (поз. 1 на рис. 4.3, 4.4) и вакуумметра (поз. 1 на рис. 4.3, 4.4). Показания занесите в табл. 4.1.

5. Откройте немного вентиль B_1 на напорной линии насоса так, чтобы вода начала поступать в ёмкость E_1 с небольшим расходом.

Измерьте по мерному стеклу объём воды, поступившей в ёмкость E_1 за время t , используя секундомер. Снимите показания ротаметра, ваттметра, манометра и вакуумметра.

6. Сделайте шесть–восемь измерений при разной степени открытия вентиля B_1 в диапазоне от полностью открытого до полностью закрытого.

7. После окончания измерений отключите электропитание кнопкой на автоматическом регуляторе. Слейте воду из ёмкости E_1 .

8. Замерьте расстояние по вертикали между точками установки манометра и вакуумметра (как разницу горизонтальных высот осей манометра и вакуумметра от пола). Диаметры напорного и всасывающего трубопроводов равны.

Примечание. Если при выполнении измерений уровень воды в ёмкости E_1 превысит $2/3$ объёма, необходимо, не отключая двигатель, прикрыть напорный вентиль B_1 и, открыв сливной вентиль B_2 , опорожнить ёмкость E_1 .

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитайте подачу насоса в каждом опыте.

Подача насоса рассчитывается по объёму воды V в ёмкости E_1 , поступившей туда за измеренный промежуток времени t :

$$\dot{V} = \frac{V}{t}. \quad (4.6)$$

2. Рассчитайте напор насоса в каждом опыте по формуле (4.1).

3. Рассчитайте полезную мощность по формуле (4.2).

4. Зная полезную и потребляемую из электрической сети мощности, определите коэффициент полезного действия насосной установки по формуле (4.5).

5. Считая, что коэффициент полезного действия двигателя $\eta_{\text{дв}} = 0,95$, а коэффициент полезного действия передачи $\eta_{\text{пер}} = 1$, определите коэффициент полезного действия насоса $\eta_{\text{н}}$.

6. По рассчитанным величинам постройте рабочую характеристику насоса: зависимости H , N_e , $\eta_{\text{н}}$ от подачи $\dot{V}$ при $n = \text{const}$.

7. Оцените точность измерений с помощью ротаметра, считая основным и корректным значение расхода, вычисленное по соотношению (4.6):

$$\delta = \left| \frac{\dot{V}_{\text{рот.}} - \dot{V}}{\dot{V}} \right| \cdot 100 \%. \quad (4.7)$$

8. Рассчитанные величины внесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты расчёта (насос 1)

№	Подача $\dot{V}$, м ³ /с	Подача по ро- таметру $\dot{V}_{рот.}$, м ³ /с	Напор насоса, H , м	Полез- ная мощ- ность, $N_{пол}$, Вт	КПД уста- новки, $\eta_{уст}$	КПД насоса, η_n	Потреб- ляемая мощ- ность, N_e , Вт	δ , %
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Насос 2

Цель работы: практическое ознакомление с насосной установкой, определение опытным путём рабочих характеристик центробежного насоса (зависимости напора, коэффициента полезного действия, потребляемой мощности от производительности насоса) и проверка законов пропорциональности.

Описание установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 4.5.

Основным элементом установки является двухступенчатый центробежный насос Н типа 1,5К-6, рабочее колесо которого приводится во вращение электродвигателем ЭД постоянного тока типа П-31 номинальной мощностью 3,2 кВт. Для питания электродвигателя переменный ток преобразуется в постоянный с помощью выпрямителя.

Рабочая жидкость (вода) перекачивается насосом из резервуара Р, расположенного ниже уровня пола, в ёмкость Е₂ по трубопроводу, состоящему из линии всасывания размером Ø 49×5,5 мм и линии нагнетания размером Ø 43×5,5 мм. Линия всасывания оборудована обратным клапа-

ном К, предотвращающим сток жидкости из неработающего насоса в резервуар Р.

На линии всасывания установлен вакуумметр (поз. 1); на линии нагнетания установлен манометр (поз. 2).

Расход перекачиваемой жидкости регулируется вентилем B_1 .

Для измерения расхода воды приёмная ёмкость E_2 оборудована водомерным стеклом (поз. 3) с отградуированной шкалой.

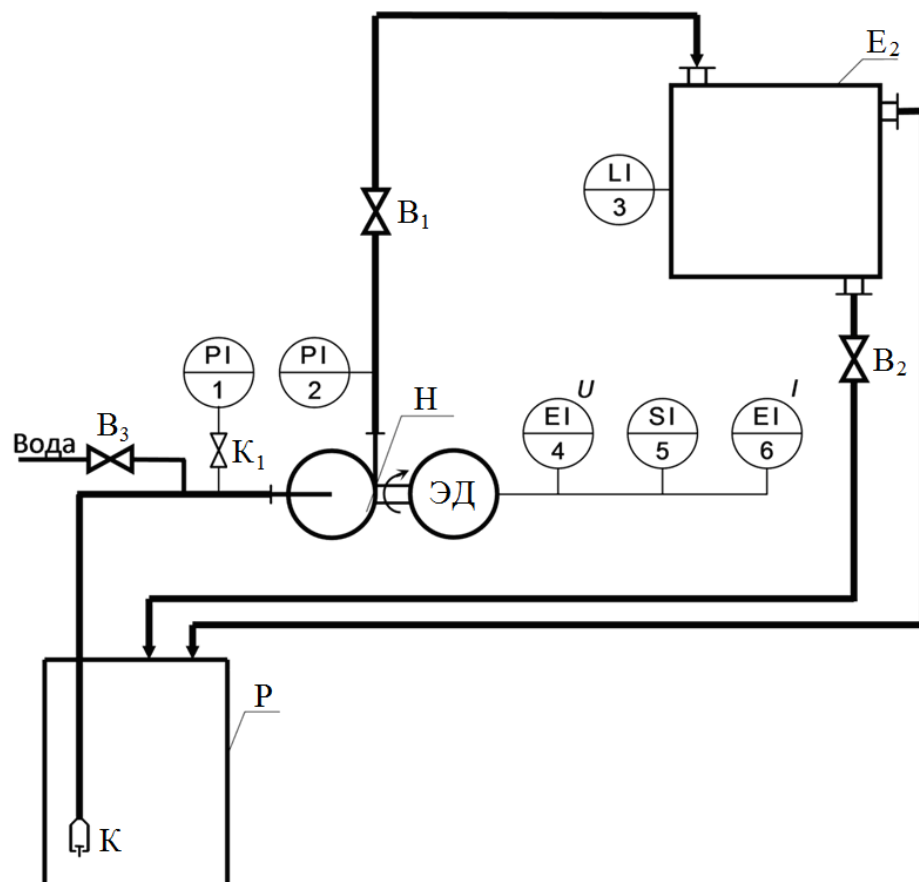


Рис. 4.5. Схема лабораторной установки для определения характеристик центробежного насоса 2 при $n = 2900$ об/мин [5]:
 Н – насос; ЭД – электродвигатель; Р – резервуар; E_2 – ёмкость; К – клапан;
 K_1 – кран; B_1, B_2, B_3 – вентили регулировочные

Во избежание переполнения ёмкость E_2 оборудована линией перелива воды обратно в резервуар Р.

Слив воды из заполненной ёмкости E_2 осуществляется также в резервуар Р.

Для измерения энергопотребления двигателем насоса установка оборудована вольтметром (поз. 4) и амперметром (поз. 6).

Частота вращения рабочего колеса насоса регулируется потенциометром и регистрируется тахометром (поз. 5).

Методика выполнения работы

Нормальное испытание насосной установки проводится в следующем порядке: определяются значения H , N_e , η_n в зависимости от подачи насоса $\dot{V}$ при заданном преподавателем постоянном числе оборотов рабочего колеса. Изменение подачи осуществляется с помощью вентиля B_1 на нагнетательном трубопроводе. Первое наблюдение проводится при полностью закрытом вентиле B_1 , а дальнейшие измерения – при постепенном открытии вентиля B_1 .

Результаты измерений необходимо внести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Измеренные величины при $n =$ _____ об/мин (насос 2)

№	Объём воды по водомерному стеклу, V , л	Время t , с	Показания манометра $p_{\text{ман}}$, кгс/см ²	Показания вакуумметра $p_{\text{вак}}$, кгс/см ²	Показания вольтметра U , В	Показания амперметра I , А

1. Перед началом работы слейте воду из ёмкости E_2 , открыв сливной вентиль B_2 . Ручку реостата, регулирующего частоту вращения электродвигателя, установите в крайнее левое положение.

2. Закройте вентили B_1 (на напорной линии) и B_2 (сливной), а также кран K_1 на линии соединения вакуумметра с всасывающим трубопроводом.

3. Откройте вентиль V_3 для заполнения насоса водой из водопроводной сети. После заполнения насоса закройте вентиль.

4. Кнопкой автоматического пускателя включите электропитание и вращая ручку реостата установите заданную частоту вращения вала электродвигателя.

5. Откройте кран K_1 (соединения вакуумметра с линией всасывания).

6. При заданной частоте вращения вала снимите показания амперметра, вольтметра, манометра и вакуумметра и внесите их в табл. 4.3.

7. Откройте немного вентиль на напорной линии насоса V_1 так, чтобы вода начала поступать в ёмкость E_2 с небольшим расходом. Скорректировав ручкой реостата частоту вращения электродвигателя до заданного значения, повторите снятие показаний вольтметра, амперметра, манометра и вакуумметра. Измерьте по мерному стеклу объем воды, поступившей в ёмкость E_2 за время t , используя секундомер.

8. Сделайте 6–8 измерений (повторив п. 7) при разной степени открытия вентиля V_1 в диапазоне от полностью открытого до полностью закрытого при заданной частоте вращения вала.

9. Повторите пункты 6–8 при других числах оборотов двигателя, заданных преподавателем.

10. После окончания измерений, закройте кран K_1 (соединения вакуумметра с линией всасывания). Ручку реостата переведите в крайнее левое положение. Отключите электропитание кнопкой на автоматическом регуляторе. Слейте воду из ёмкости E_2 , открыв сливной вентиль V_2 .

Примечание. Если при выполнении измерений уровень воды в ёмкости E_2 превысит $2/3$ объёма, необходимо, не отключая двигатель, прикрыть напорный вентиль V_1 и, открыв сливной вентиль V_2 , опорожнить ёмкость E_2 .

Обработка экспериментальных данных

Для каждого опыта:

1. Рассчитайте подачу насоса по формуле (4.6).

2. Рассчитайте напор насоса по формуле (4.1). Расстояние по вертикали от точки присоединения вакуумметра до центра манометра h_0 прими-

те равным 77 мм.

3. Вычислите полезную мощность по формуле (4.2).

4. Рассчитайте потребляемую электродвигателем мощность по показаниям вольтметра и амперметра в сети электродвигателя:

$$N_{\text{дв}} = U \cdot I, \quad (4.7)$$

где U – напряжение, В; I – сила тока, А.

5. Определите коэффициент полезного действия (КПД) насосной установки («насос–передача–электродвигатель») по формуле (4.5).

6. Зная КПД насосной установки, а также КПД электродвигателя (здесь $\eta_{\text{дв}} = 0,815$) и КПД передачи механической энергии от двигателя к насосу ($\eta_{\text{пер}} = 1$), вычислите коэффициент полезного действия насоса $\eta_{\text{н}}$ используя формулу (4.4) и потребляемую мощность (мощность на валу рабочего колеса насоса) по формуле:

$$N_{\text{е}} = \frac{N_{\text{пол}}}{\eta_{\text{н}}} = N_{\text{дв}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}}. \quad (4.8)$$

7. По рассчитанным величинам постройте рабочие характеристики насоса: зависимости H , $N_{\text{е}}$, $\eta_{\text{н}}$ от подачи $\dot{V}$ при $n = \text{const}$.

8. Проверьте, как изменяются производительность, напор и полезная мощность в зависимости от числа оборотов рабочего колеса насоса, и сравните результаты с вычисленными по законам пропорциональности.

9. Рассчитанные величины внесите в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты расчёта при $n = \underline{\hspace{2cm}}$ (насос 2)

№	Подача $\dot{V}$, м ³ /с	$v_{\text{н}}$, м/с	$v_{\text{вс}}$, м/с	Напор насоса, H , м	Полезная мощность, $N_{\text{пол}}$, Вт	$N_{\text{дв}}$, Вт	КПД установки, $\eta_{\text{уст}}$	КПД насоса, $\eta_{\text{н}}$	$N_{\text{е}}$, Вт

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип работы одно- и многоступенчатых центробежных насосов. Область применения.
2. Почему центробежный насос требуется заполнять при пуске?
3. Для каких целей на конце всасывающей трубы размещают клапан с сеткой?
4. Назовите параметры, характеризующие работу центробежного насоса.
5. Какой напор и какую производительность создают одно- и многоступенчатые насосы?
6. Как определить максимальную высоту всасывания насоса? От каких параметров она зависит?
7. Что такое универсальная характеристика насоса?
8. Явление кавитации. Как кавитация сказывается на работе насоса? Меры борьбы с кавитацией.
9. Что такое гидравлическая сеть и как рассчитать потерянный напор в сети?
10. Что такое рабочая точка насоса? Как подобрать насос к данной гидравлической сети?
11. Какие ещё (кроме центробежного) насосы применяются в химической промышленности?
12. Как работает поршневой (плунжерный) насос? Его достоинства и недостатки, область применения.
13. Что такое напор и каким уравнением описывается напор насоса?

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсовых работ
по дисциплине
«Процессы и аппараты химической технологии»**

Направление подготовки	18.03.01 Химическая технология
Направленность (профиль)	Основной органический и нефтехимический синтез

Ставрополь, 2025

Общие положения

Требования к выполнению и защите курсовых работ (проектов) в ФГАОУ ВО «СКФУ» определяет Положение об организации и выполнении курсовых работ (проектов) в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

Курсовая работа для обучающихся по направлению подготовки 04.03.01 Химия по дисциплине общая и неорганическая химии выполняется в 1,2 семестре.

Выполнение курсовой работы (проекта) имеет целью расширение знаний студентов по профильным химическим дисциплинам, обучение методам теоретического анализа явлений и закономерностей химической науки, отработку навыков самостоятельного применения теоретических знаний к комплексному решению профессиональных задач, использования справочной литературы, методов математической обработки экспериментальных данных, компьютерных технологий. Системой курсовых работ (проектов) студент подготавливается к выполнению выпускной квалификационной работы.

Курсовая работа является частью научно-исследовательской работы студента и имеет целью закрепление студентом навыков самостоятельного выполнения фундаментальных и прикладных работ поискового, теоретического и экспериментального направления, владением навыками проведения химического эксперимента, основными синтетическими и аналитическими методами получения и исследования химических веществ и реакций, работы с оригинальной литературой – монографиями, статьями в научных журналах, работы с реферативной литературой, а также представления материала в общепринятой форме научного отчета.

Тематика курсовых работ.

Одним из важных компонентов при выполнении курсовой работы является определение тематики. Тематика курсовых работ является актуальной, отвечает учебным задачам дисциплин неорганическая химия, а также потребностям науки и практики. Актуальность тематики курсовых работ обусловлена научностью, современностью и направленностью к получению студентами навыков самостоятельной творческой и научно-исследовательской работы.

Темы курсовых работ (проектов) являются комплексными, т.е. содержат ряд взаимосвязанных между собой проблем и опираются на фактический материал профильных предприятий и учреждений химического профиля, а также на итоги НИР студентов, на научные работы членов кафедры, студен-

ческих научных кружков и проблемных групп; используют новейшие достижения отечественной и зарубежной науки, актуальные прикладные аспекты.

Темы курсовых работ (проектов) утверждаются на заседании кафедры, в течение 2-х недель после начала семестра, затем распоряжением института об утверждении тем курсовых работ (проектов).

Основные содержательные и процессуальные аспекты, необходимые для выполнения работы, оформляются кафедрой в заданиях по курсовому проектированию. В заданиях четко формулируется тема работы (проекта) и требования, определяющие ее объем, содержание, а также исходные данные.

Содержание и структура курсовых работ (проектов)

Курсовая работа (проект) должна содержать элементы новизны, наряду с фундаментальным аспектом должен быть проведен анализ современного состояния изучаемой проблемы. В связи с чем, задание по курсовой работе (проекту) индивидуализировано с учетом интересов и способностей студентов.

Курсовая работа (проект) должна состоять из введения, теоретической части, эмпирической (практической) части, заключения, списка литературы и приложения. В отдельных случаях, в соответствии с тематикой работы (проекта), эмпирическая часть может отсутствовать.

Титульный лист оформляется в соответствии с Положением об организации и выполнении курсовых работ (проектов) в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования; отражаются объект, предмет, задачи, цели, методы, новизна, теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая часть должна содержать анализ состояния изучаемой проблемы на основе обзора научной, научно-информационной, справочной литературы. Представленный материал должен быть логически связан с целью исследования. В параграфах теоретической части необходимо отражать отдельные компоненты проблемы и завершать их выводами.

Эмпирическая (практическая) часть включает описание системы экспериментального исследования, обоснование методов исследования, анализ результатов экспериментального исследования, схемы, графические и математические способы интерпретации полученных данных, выводы.

Заключение содержит выводы, подтверждающие или опровергающие первоначальные предположения (гипотезы), перспективы дальнейшего изу-

чения проблемы, связь с практикой, анализ реализации целей и задач исследования.

Список литературы должен быть составлен в соответствии с требованиями ГОСТа к оформлению библиографии.

Приложение содержит весь фактический материал экспериментальных исследований (схемы, чертежи, расчетные материалы, рисунки и т.д.).

Курсовую работу(проект) рекомендуется представлять в объеме 1–2 печатных листа. Текст работы должен быть напечатан через 1,5 интервала на одной стороне стандартного листа белой бумаги (А-4). Текст и другие отпечатанные элементы работы должны быть черными, контуры букв и знаков четкими, без ореола и затенения. Шрифт Times New Roman, кегель 14. Названия глав и параграфов выделяются полужирным шрифтом. Лист с текстом должен иметь поля: слева –30 мм, справа –10 мм, сверху –20 мм, снизу –20 мм. Нумерация страниц текста делается в правом нижнем углу листа. Проставлять номер страницы необходимо со страницы, где печатается «Введение», на которой ставится цифра «3». После этого нумеруются все страницы, включая приложения.

Между названием главы и названием параграфа этой главы ставится пробел равный двум интервалам, а название параграфа не должно отделяться от текста этого параграфа пробелом. Названия параграфов отделяются от текста предыдущего параграфа пробелом, равным двум интервалам. Каждая глава, а также введение, выводы, приложения и список использованной литературы начинаются с новой страницы. Слово «Глава» не пишется. Главы имеют порядковые номера в пределах всей работы, обозначаемые арабскими цифрами (например: 1,2,3), после которых ставится точка. Слово «параграф» или значок параграфа в названии не ставятся. Параграфы имеют порядковые номера в пределах глав, обозначаемые арабскими цифрами (например: 1.1. и 1.2.). Заголовки глав и параграфов в тексте работы должны располагаться по центру, точку в конце названия главы и параграфа не ставят. Не допускается переносить часть слова в заголовке.

Нумерация таблиц и рисунков может быть сквозной или соотноситься с номером главы и параграфа. Например, если таблица или рисунок включены в текст первого параграфа второй главы, нумерация следующая: Таблица 2.1.1., рис. 2.1.1. Последняя цифра означает порядковый номер таблицы (или рисунка) в данном параграфе. Таблица помещается в качестве следующей страницы после первого упоминания о ней в тексте.

Отчет по курсовой работе должен состоять из следующих частей:

1. Введение. Введение должно быть кратким и наглядно демонстри-

ровать зачем проводилась эта работа;

2. Литературный обзор, в котором приводятся и обсуждаются литературные данные по теме работы, а также по методам получения, свойствам и применению вещества, которое изучается или синтезируется студентом по оригинальной методике. При подборе литературы можно использовать учебники, монографии или обзорные статьи, где имеются ссылки на литературу. Литературный обзор не должен быть формальной сводкой литературы. Необходимо критически проанализировать литературные данные и на этой основе сформулировать выводы, отражающие соответственную сравнительную оценку рассматриваемых свойств и методов синтеза.

3. Обсуждение полученных результатов посвящается описанию выполненной работы и обсуждению полученных результатов. Построение этой части определяется спецификой работы и соображениями автора о наиболее оптимальном варианте подачи материала. Раздел завершается

обсуждением полученных результатов в сопоставлении с литературными данными;

4. Экспериментальная часть*

При оформлении этой части работы следует руководствоваться правилами принятыми для публикации статей в журнале В начале экспериментальной части приводятся названия приборов, на которых выполнялась курсовая работа.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ
по дисциплине
«Процессы и аппараты»**

Направление подготовки 18.03.01 Химическая технология
Профиль Химический инжиниринг и цифровые технологии

Ставрополь, 2026

Цель самостоятельной работы студентов:

1. Систематизировать современные процессы интеграции Российского высшего образования в общеевропейскую и мировую образовательную практику; раскрыть сущность проблем организации учебно-воспитательного процесса на современном этапе развития высшего образования.

2. Подобрать такой дидактический материал для самостоятельной работы, который бы позволил применить полученные знания на практике и развивать инициативу, активность и творческие способности.

3. Помочь студентам в формировании у них компетенций, согласно учебного плана.

Основными **формами работы и контроля** студентов являются:

Индивидуальное решение заданий, позволяющих оценивать и диагностировать уровень обученности, уровень умений и навыков по дисциплине.

Собеседование - форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя со студентом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, рассчитанная на выяснение объема знаний студента по определенному разделу, теме, проблеме и т. п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающая всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

Реферат – раскрытие сущности исследуемой проблемы, включающее обращение к различным точкам зрения на вопрос, а также изложение собственных взглядов на нее.

Индивидуальное решение заданий, позволяющих оценивать и диагностировать уровень обученности, уровень умений и навыков аспирантов по дисциплине

Для подготовки к выполнению задания следует изучить и проанализировать рекомендованную литературу и на их основании подготовиться к изложению темы.

При проверке задания оцениваются

- уверенное владение материалом;
- умение четко и логично излагать свои мысли;
- умение творчески подходить к решению основных проблем темы;
- самостоятельность мышления, умение отстаивать свою позицию в ходе последующих дискуссий,
- самостоятельная и выразительная устная речь, полностью раскрывающая суть проблематики задания.

Собеседование - форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя со студентом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, рассчитанная на выяснение объема знаний студента по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающая всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

Принципиальные отличия заданий базового уровня от повышенного заключаются в большем объеме фактов и событий, в сравнительно-аналитическом характере изложения материала, его теоретической (методологической) составляющей.

Для подготовки к каждой теме следует изучить и законспектировать рекомендованные источники и научную литературу и на их основании подготовиться к указанным в методических материалах вопросам для обсуждения.

При проверке задания, оцениваются:

- активное участие в работе;
- уверенное владение материалом;
- умение четко и логично излагать свои мысли;
- умение творчески подходить к решению основных вопросов темы;
- самостоятельность мышления,
- полное соответствие конспекта установленным требованиям;
- самостоятельная устная речь, полностью раскрывающая суть проблематики собеседования.

Реферат – раскрытие сущности исследуемой проблемы, включающее обращение к

различным точкам зрения на вопрос, а также изложение собственных взглядов на нее.

Структура и содержание реферата

Структура реферата включает в себя следующие элементы:

- титульный лист;
- оглавление;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список литературы и источников;
- приложение.

Титульный лист – это информация о выходных данных вашей работы. Он является первой страницей научной работы и заполняется по строго определенным правилам. Титульный лист не нумеруется.

В *оглавлении* текста последовательно излагаются названия пунктов реферата с указанием страницы, с которой начинается каждый пункт. Заголовки оглавления должны точно повторять заголовки в тексте. Сокращать или давать их в другой формулировке, последовательности и соподчиненности по сравнению с заголовками в тексте нельзя. Заголовки одинаковых ступеней рубрикации необходимо располагать друг под другом. Заголовки каждой последующей ступени смещают на три–пять знаков вправо по отношению к заголовкам предыдущей ступени. Все заголовки начинают с прописной буквы без точки на конце. Последнее слово каждого заголовка соединяют отточием с соответствующим ему номером страницы в правом столбце оглавления.

Введение к работе. Здесь обычно обосновываются актуальность выбранной темы, цель и содержание поставленных задач, формулируются объект и предмет исследования, указывается избранный метод (или методы) исследования.

Содержание глав основной части должно точно соответствовать теме реферата и полностью её раскрывать. Эти главы должны показать умение автора сжато, логично и аргументировано излагать материал. Важно понимать, что каждая глава должна представлять собой законченное произведение. Её следует начинать постановкой рассматриваемой задачи, а завершать четкими, аргументированными выводами. Все приводимые в работе данные обязательно следует сопровождать подстрочной ссылкой на источник, описание которого должно приводиться в соответствии с требованиями библиографических стандартов. Как правило, основная часть реферата состоит из 2–3 глав, которые в случае необходимости разбиваются на параграфы.

Реферат заканчивается заключительной частью, которая так и называется «*заключение*». Этот синтез – последовательное, логически стройное изложение полученных итогов и их соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными и сформулированными во введении.

После заключения помещается *библиографический список использованной литературы*, куда включаются оригинальные тексты, монографические исследования, научные статьи, учебные пособия и др. Каждый включенный в такой список литературный источник должен иметь отражение в тексте реферата. Если автор реферата делает ссылку на какие-либо заимствованные факты или цитирует работы других авторов, то он должен обязательно указать в подстрочной ссылке, откуда взяты приведенные материалы. Список литературы должен включать не менее 10 источников.

Объем реферата должен составлять не менее 24 страниц машинописного текста. Объем приложений не ограничивается.

Общие требования к оформлению реферата

Текст реферата должен быть напечатан на одной стороне стандартного листа белой односторонней бумаги формата А4 (210×297 мм) через полтора интервала (размер шрифта – 14) с применением черных чернил с полями вокруг текста. Размер левого поля 30 мм, правого – 10 мм, верхнего – 20 мм, нижнего – 20 мм. При таких полях каждая страница должна содержать приблизительно 1800 знаков (30 строк, по 60 знаков в строке, считая каждый знак препинания и пробел между словами также за печатный знак).

Текст перепечатывается в строго последовательном порядке. Не допускаются разного рода текстовые вставки и дополнения, помещаемые на отдельных страницах или на оборотной стороне листа, и переносы кусков текста в другие места. Все сноски и подстрочные примечания перепечатываются (через один интервал) на той странице, к которой они относятся. Все страницы нумеруются, начиная с титульного листа. Цифру, обозначающую порядковый номер страницы, ставят в правом углу верхнего поля листа (на первой и второй странице цифру, обозначающую порядковый номер, не ставят).

Приложение для рефератов является желательным, но необязательным элементом. В приложение обычно входят различные таблицы, графики, схемы, рисунки и т.п. Приложения помещают после списка использованных библиографических источников в порядке их упоминания в тексте. Каждое приложение следует начинать с нового листа. Приложение не входит в параметры минимального объема работы

Критерии оценки самостоятельной работы студентов

Критерии оценивания результатов самостоятельной работы студентов разработаны с учетом требований ФГОС ВО. Задания, выносимые на самостоятельную работу, оцениваются по шкале «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов; исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно излагает материал; свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний; использует в ответе дополнительный материал все предусмотренные программой задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному; анализирует полученные результаты; проявляет самостоятельность при выполнении заданий.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено полностью, необходимые практические компетенции в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения достаточно высокое. Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, большинство предусмотренных программой заданий выполнено, но в них имеются ошибки, при ответе на поставленный вопрос студент допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, наблюдаются нарушения логической последовательности в изложении программного материала.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы, необходимые практические компетенции не сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнено, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному.

Вопросы к экзамену

Часть 1. Основные закономерности протекания химико-технологических процессов.

На жидкость, находящуюся в состоянии движения или покоя, действуют объемные и поверхностные силы.

Характеристикой интенсивности силы тяжести является удельный вес.

На каждый элемент данного объема жидкости действуют объемные силы.

Характеристикой интенсивности поверхностных сил является напряжение на поверхности.

Уравнение расхода жидкости $Q = wS$; $M = wSp$.

Режим движения жидкости при $Re < 2300$ ламинарный.

Режим движения жидкости при $Re > 10000$ турбулентный.

Критическое значение критерия Рейнольдса 2300

Критерий Рейнольдса:

$$Re = wd\rho/\mu$$

$$Re = wd/\nu$$

Потенциал переноса - удельная (отнесенная к единице объема) масса, энергия или количество движения.

В неподвижных средах и в ламинарно движущихся потоках осуществляется молекулярный перенос субстанции.

Первым законом Фика описывается молекулярный перенос массы.

Законом Фурье описывается молекулярный перенос энергии.

Уравнение для молекулярного переноса импульса (с учетом закона внутреннего трения Ньютона):

$$\begin{aligned}\vec{q}_{mw} &= -\mu \operatorname{grad} \vec{w} \\ \vec{q}_{mw} &= -\mu \operatorname{grad} (p\vec{w})/\rho\end{aligned}$$

Уравнение неразрывности (сплошности) потока для неустановившегося движения:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \vec{w}$$

Уравнение неразрывности (сплошности) потока для установившегося движения:

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0$$

Уравнение неразрывности (сплошности) потока в интегральной форме для установившегося движения:

$$\vec{w} \cdot \vec{S} = \text{const}$$

Интегралом дифференциальных уравнений движения Эйлера для установившегося потока является уравнение Бернулли.

Интегралом дифференциальных уравнений равновесия Эйлера для покоящейся жидкости является уравнение гидростатики.

Часть 2. Основы моделирования на примере теории подобия.

Метод решения задач исследования и расчета химико-технологических процессов – теоретический метод (моделирование).

Условия, которые полностью, однозначно характеризуют данное явление – условия однозначности.

Условия однозначности включают: геометрическую форму и размеры системы; физические свойства веществ; начальные условия; граничные условия.

Моделирование - исследование объектов познания на их моделях

Основу теории подобия составляет метод обобщенных переменных

Одним из основных принципов теории подобия является выделение из класса явлений, описываемых общим законом, группы подобных явлений

Подобными называют такие явления, для которых отношение сходственных и характеризующих их величин постоянны.

Геометрическое подобие предполагает, что сходственные размеры модели и натуре параллельны, а их отношение выражается постоянной величиной.

Константа геометрического подобия (масштабный множитель):

$$D_1/D_2 = L_1/L_2 = l_1/l_2 = \dots = a_l = \text{const}$$

Константа временного подобия:

$$T_1/T_2 = \tau_1/\tau_2 = a_\tau = \text{const}$$

Константы физического подобия:

$$\mu_1/\mu_2 = \text{const}, \rho_1/\rho_2 = \text{const}, u_1/u_2 = \text{const}$$

В общем случае константы физического подобия неравны.

Безразмерные числа i , выражающие отношение двух однородных величин в подобных системах называются инвариантами подобия.

В зависимости от соотношения размеров модели и натуры инварианты подобия не изменяются

Инварианты подобия, представляющие собой отношение однородных величин, называют симплексами или параметрическими критериями

Инварианты подобия, представляющие собой отношение разнородных величин, называют критериями подобия

Равенство критериев подобия – единственное количественное условие подобия процессов

Если отношение констант подобия равно 1, оно носит название индикатора подобия

Если константы подобия найдены из условий однозначности, то образованные из них критерии называют определяющими.

Критерий подобия, в который входит искомая величина, называют определяемым.

Обобщенное (критериальное) уравнение:

$$f(K_1, K_2, K_3, \dots) = 0$$

$$K_1 = f(K_2, K_3, \dots)$$

$$K_1 = AK_2^n K_3^m, \dots$$

В основе метода анализа размерностей лежит π -теорема Бекингема.

Критерий гомохронности характеризует неустановившееся состояние процесса:

$$Ho = w\tau/l$$

Критерий Эйлера характеризует влияние перепада гидростатического давления на движение жидкости:

$$Eu = \Delta P / (\rho w^2)$$

$$Eu = P / (\rho w^2)$$

Критерий Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам трения и определяет режим движения во всех сходственных точках подобных систем:

$$Re = wd\rho/\mu$$

$$Re = wd/\nu$$

Критерий Фруда характеризует влияние сил тяжести на движение жидкости:

$$Fr = w^2/gl$$

Обобщенное критериальное уравнение гидродинамики:

$$f(Ho, Eu, Fr, Re) = 0$$

$$f_1(Ho, Fr, Re) = Eu$$

Мгновенная скорость потока в любой точке аппарата или его модели - поле скоростей в потоке.

Модели гидродинамической структуры потоков - упрощенные теоретические модели движения сред в аппаратах.

Кривая изменения концентрации в потоке на выходе - кривая отклика (выходная кривая).

В аппарате идеального вытеснения частицы потока движутся параллельно друг другу с одинаковой скоростью, поперечное и продольное перемешивание отсутствуют.

В аппарате идеального смешения время пребывания частиц потока распределено неравномерно.

Для модели идеального вытеснения характерным является равномерность скоростей и времени пребывания частиц.

Для модели идеального смешения характерным является равномерность концентраций и температуры по объему.

Параметром, характеризующим ячеечную модель является число ячеек.

Основой диффузионной модели является модель идеального вытеснения, осложненная обратным перемешиванием.

Среднее время пребывания частиц в аппарате идеального вытеснения

$$\tau_{\text{ср}} = V_a / Q$$

Продольное перемешивание характеризуют критерием подобия Пекле:

$$Pe_L = wL/D_L$$

Часть 3. Гидравлика.

Гидростатика изучает равновесие жидкостей, находящихся в состоянии относительного покоя.

Основное уравнение гидростатики:

$$z_1 + p_1 / (\rho g) = z_2 + p_2 / (\rho g)$$

$$z + p / (\rho g) = \text{const}$$

Величину z , характеризующую расстояние данной точки до произвольно выбранной горизонтальной плоскости отсчета называют нивелирной высотой.

Удельную потенциальную энергию положения данной точки над произвольно выбранной плоскостью сравнения характеризует геометрический напор.

Величина $p / (\rho g)$ - гидростатический напор (пьезометрический напор).

Гидростатический напор представляет собой энергию, приходящуюся на единицу веса жидкости, и характеризует удельную потенциальную энергию давления в данной точке.

Сумма потенциальных энергий положения и давления в покоящейся жидкости является величиной постоянной.

Сумма потенциальных энергий положения и давления в покоящейся жидкости равна полному гидростатическому напору

«Давление, создаваемое в любой точке покоящейся несжимаемой жидкости, передается во все стороны с одинаковой силой» - закон Паскаля.

Выражение закона Паскаля:

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2)$$

$$\Delta p = \rho g(z_1 - z_2)$$

Пьезометр, вакуумметр – приборы для измерения давления.

Интегрирование дифференциальных уравнений движения идеальной жидкости дает уравнение Бернулли. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости:

$$z + p / (\rho g) + w^2 / (2g) = \text{const} = H$$

Общий или гидродинамический напор:

$$[z + p / (\rho g) + w^2 / (2g)]$$

Удельная кинетическая энергия в данном сечении (точке) потока или динамический напор $w^2 / (2g)$

Уравнение Бернулли выражает энергетический баланс потока.

Уравнение Гагена-Пуазейля:

$$Q = \Delta p \pi d^4 / (128 \mu L)$$

Уравнение Гагена-Пуазейля используется в случае стационарного ламинарного движения несжимаемой жидкости в трубе круглого сечения

Потери давления на трение при ламинарном режиме пропорциональны скорости w .

Потери давления на трение при турбулентном режиме пропорциональны $w^{1,75}$.

Уравнение расхода жидкости при известной средней скорости:

$$Q = w \pi d^2 / 4$$

Диаметр трубопровода при средней скорости жидкости w :

$$d = [4Q / (\pi w)]^{0,5}$$

Среднюю скорость потока измеряют с помощью дроссельных приборов.

К дроссельным приборам относятся диафрагмы, мерные сопла, труба Вентури. По принципу действия насосы подразделяют на объемные и динамические.

В объемных насосах энергия и давление повышаются в результате вытеснения жидкости телами, движущимися возвратно-поступательно или вращательно.

В динамических насосах энергия и давление жидкости повышаются под действием центробежной силы или сил трения

К объемным насосам относятся поршневые, плунжерные, диафрагменные, шестеренные, винтовые

К динамическим насосам относятся центробежные, осевые, струйные, вихревые

Объем жидкости, подаваемый в нагнетательный трубопровод в единицу времени - производительность насоса

Избыточная удельная энергия, сообщаемая насосом единице массы жидкости – напор.

Напор насоса H рассчитывают по уравнению Бернулли.

Полезная мощность насоса N_n , затрачиваемая им на сообщение жидкости энергии:

$$N_n = \rho g Q H$$

Действительная мощность на валу насоса больше полезной мощности

Задачи

1. В трубопроводе диаметром 96*3,5 мм течет вода, расход которой 3,6 м³/ч. Вязкость воды 1*10⁻³ Па*с. Чему равен критерий Рейнольдса?
2. В трубопроводе диаметром 96*3,5 мм течет вода, расход которой 0,36 м³/ч. Вязкость воды 1*10⁻³ Па*с. Чему равен критерий Рейнольдса?
3. В трубопроводе диаметром 96*3,5 мм течет жидкость, расход которой 3,6 м³/ч. Вязкость воды 1,5*10⁻³ Па*с, плотность – 1500 кг/м³. Чему равен критерий Рейнольдса?
4. В трубопроводе диаметром 66*3 мм течет вода, расход которой 3,6 м³/ч. Вязкость воды 1*10⁻³ Па*с. Чему равен критерий Рейнольдса?
5. Воздух с температурой 50 °С подается вентилятором в установку. Диаметр трубопровода 102*6 мм, плотность воздуха 1,09 кг/м³, вязкость 0,02 мПа*с. Расход воздуха 0,103 м³/с. Определить режим движения воздуха.
6. Воздух с температурой 50 °С подается вентилятором в установку. Диаметр трубопровода 102*6 мм, плотность воздуха 1,09 кг/м³, вязкость 0,02 мПа*с. Расход воздуха 0,003 м³/с. Определить режим движения воздуха.
7. Воздух с температурой 50 °С подается вентилятором в установку. Диаметр трубопровода 57*6 мм, плотность воздуха 1,09 кг/м³, вязкость 0,02 мПа*с. Расход воздуха 0,003 м³/с. Определить режим движения воздуха.
8. Манометр на трубопроводе, заполненном водой, показывает давление 0,19 МПа. Определить высоту, на какую поднимется жидкость в открытом пьезометре над точкой присоединения манометра.
9. Манометр на трубопроводе, заполненном водой, показывает давление 0,15 МПа. Определить высоту, на какую поднимется жидкость в открытом пьезометре над точкой присоединения манометра.
10. Манометр на трубопроводе, заполненном жидкостью плотностью 1200 кг/м³, показывает давление 0,19 МПа. Определить высоту, на какую поднимется жидкость в открытом пьезометре над точкой присоединения манометра.

Часть 4. Тепловые процессы

Процессы, скорость которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты, называют тепловыми.

Аппараты, в которых осуществляются тепловые процессы, называют теплообменниками.

Явление теплопроводности состоит в том, что перенос теплоты происходит путем непосредственного соприкосновения между микрочастицами

Теплопроводность в подвижных средах при турбулентном режиме движения имеет значение в тонком пограничном слое.

В неподвижных средах и при ламинарном режиме движения при отсутствии излучения теплопроводность единственный способ передачи теплоты.

Процесс распространения энергии с помощью электромагнитных колебаний – это тепловое излучение.

Перенос теплоты вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов жидкости или газа - явление конвекции.

Перенос теплоты от более нагретой среды к менее нагретой через разделяющую их стенку называют теплопередачей.

Вещества, участвующие в теплопередаче, называют теплоносителями.

При стационарном процессе теплопередачи температура изменяется в пространстве, не зависит от времени/

При нестационарном процессе теплопередачи температура изменяется в пространстве, изменяется во времени.

Необходимым условием теплопередачи является неравенство температур.

Геометрическое место всех точек с одинаковой температурой представляет собой изотермическую поверхность

Мерой интенсивности изменения температуры в данной точке является температурный градиент.

Основное уравнение теплопередачи:

$$Q = KF\Delta t_{cp}\tau$$

$$Q = KF\Delta t_{cp}$$

Тепловой поток Q определяют по уравнениям теплового баланса:

$$Q = G_1(H_{1н} - H_{1к}) = G_2(H_{2к} - H_{2н})$$

$$Q = G_1c_1(t_{1н} - t_{1к}) = G_2c_2(t_{2к} - t_{2н})$$

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному за 1 с через 1 м² стенки при разности температур между теплоносителями 1 град.

Уравнение теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплопереноса:

$$Q = \lambda(t_{ст.1} - t_{ст.2})F\tau/\delta$$

$$q = \lambda(t_{ст.1} - t_{ст.2})/\delta$$

Величина λ/δ характеризует тепловую проводимость стенки.

Величина δ/λ характеризует термическое сопротивление стенки.

Для многослойной стенки общее термическое сопротивление равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев.

Расчет скорости теплоотдачи осуществляют с помощью закона охлаждения Ньютона (уравнения теплоотдачи).

Уравнение теплоотдачи:

$$Q = \alpha(t_{ж} - t_{ст})F\tau$$

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество теплоты передается от теплоносителя к 1 м² стенки в единицу времени при разности температур между теплоносителем и стенкой в 1 град.

Зависимости для расчета скорости процесса теплоотдачи получают преобразованием дифференциальных уравнений методом теории подобия.

Критерий Фурье характеризует условия подобия неустановившихся процессов теплоотдачи.

Критерий Фурье является аналогом критерия гомохронности.

Выражение для критерия Фурье:

$$Fo = \alpha \tau / l^2$$

Критерий Пекле характеризует соотношение между интенсивностью переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью в движущемся потоке

Выражение для критерия Пекле:

$$Pe = wl/\alpha$$

Критерий Нуссельта характеризует отношение суммарного переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью к теплоте, передаваемой теплопроводностью.

Выражение для критерия Нуссельта:

$$Nu = \alpha l / \lambda$$

Критерий Нуссельта является определяемым.

Критериальное уравнение теплоотдачи:

$$f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr, Re) = 0$$

$$Nu = f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re)$$

Для установившегося процесса теплоотдачи критериальное уравнение:

$$f(Nu, Pe, Fr, Re) = 0$$

$$Nu = f(Pe, Fr, Re)$$

Критерий Пекле представляют в виде произведения следующих безразмерных комплексов:

$$Pe = RePr$$

Критерий Прандтля характеризует подобие физических свойств теплоносителей

Критерий Прандтля:

$$Pr = \nu / a$$

Критерий Фруда может быть исключен из критериального уравнения в случае вынужденной теплоотдачи.

Критерий Фруда отражает действие сил тяжести:

$$Fr = w^2 / (gl)$$

При естественной конвекции критерий Фруда заменяют производным критерием Архимеда:

$$Ar = (gl^3 / \nu^2) (\Delta \rho / \rho)$$

$$Ar = Ga \Delta \rho / \rho$$

Критерий Галилея : $Ga = gl^3 / \nu^2$

Теплоотдача при конденсации насыщенных паров протекает при постоянной температуре.

При конденсации насыщенных паров происходит одновременный перенос теплоты и массы.

При конденсации насыщенных паров перенос теплоты определяется теплотой парообразования.

При конденсации насыщенных паров перенос массы определяется количеством сконденсированного пара.

Конденсацию пара, при которой на хорошо смачиваемых поверхностях капли конденсата образуют жидкую пленку, стекающую вниз под действием силы тяжести, называют пленочной.

Конденсацию пара, при которой на несмачиваемых поверхностях капли конденсата не образуют жидкую пленку, называют капельной.

Задачи:

1. Начальная температура воды 10°C , конечная – 25°C . Теплоемкость воды $4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Расход азота $1240 \text{ м}^3/\text{ч}$, плотность азота $1,25 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость азота $1050 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31°C .
2. Начальная температура воды 5°C , конечная – 25°C . Теплоемкость воды $4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Расход азота $1240 \text{ м}^3/\text{ч}$, плотность азота $1,25 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость азота $1050 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 95 до 31°C .
3. Начальная температура воды 10°C , конечная – 25°C . Теплоемкость воды $4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Расход азота $620 \text{ м}^3/\text{ч}$, плотность азота $1,25 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость азота $1050 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31°C .
4. Начальная температура воды 10°C , конечная – 25°C . Теплоемкость воды $4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Расход азота $124 \text{ м}^3/\text{ч}$, плотность азота $1,25 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость азота $1050 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$. Определить количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31°C .
5. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 75 мм . Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 40 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
6. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 150 мм . Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 40 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
7. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 75 мм . Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 10 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
8. Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 150 мм . Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 10 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какова величина потерь теплоты через слой изоляции?
9. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 30 мм . Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какое количество теплоты теряется паропроводом с 1 м^2 ?
10. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 60 мм . Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какое количество теплоты теряется паропроводом с 1 м^2 ?
11. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 15 мм . Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Какое количество теплоты теряется паропроводом с 1 м^2 ?

Часть 5. Массообменные процессы

Процессы, в которых основную роль играет перенос вещества из одной фазы в другую, называют массообменными.

Движущей силой массообменных процессов является разность химических потенциалов.

Движущая сила массообменных процессов характеризует степень отклонения системы от состояния равновесия

В пределах данной фазы вещество переносится от точки с большей концентрацией в точку с меньшей (от точки с большим химическим потенциалом в точку с меньшим).

Обычно в расчетах приближенно движущую силу выражают через разность концентраций.

Избирательное поглощение газов или паров жидким поглотителем – абсорбция.

Абсорбция – это переход вещества из газовой (паровой) фазы в жидкую.

Перегонка и ректификация – разделение жидких гомогенных смесей на компоненты при взаимодействии потоков жидкости и пара

Экстракция – извлечение растворенного в одной жидкости вещества другой жидкостью практически не смешивающейся с первой.

Адсорбция – избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ твердым поглотителем.

Избирательное извлечение ионов из растворов электролитов - ионный обмен.

Процесс перехода влаги из твердого влажного материала в газовую или паровую фазы - сушка.

Кристаллизация – выделение твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов

Мембранные процессы – избирательное извлечение компонентов смеси или их концентрирование с помощью полупроницаемых перегородок

Процесс перехода вещества из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называется массопередачей.

Массопередача осуществляется при непосредственном соприкосновении фаз или через разделяющую фазы мембрану.

Граница соприкосновения фаз может быть подвижной или неподвижной.

Перенос вещества из фазы к границе раздела фаз или наоборот называется массоотдачей.

Процессы массопереноса обычно обратимые.

Направление перехода вещества из одной фазы в другую определяется концентрациями вещества в фазах и условиями равновесия.

Массообменные процессы протекают только при нарушении фазового равновесия.

Переход вещества в неподвижной среде из внутренних слоев одной фазы через границу раздела фаз и распределение по всему объему второй фазы называется молекулярной диффузией.

Молекулярная диффузия является следствием теплового движения молекул.

Молекулярной диффузии основное сопротивление оказывают силы внутреннего трения.

Перенос вещества движущимися частицами потока в условиях турбулентного движения фаз называют конвективным переносом (конвективной диффузией).

Скорость перехода вещества из одной фазы в другую пропорциональна разности между рабочей и равновесной концентрациями.

Основным кинетическим уравнением массообменных процессов является уравнение массопередачи:

$$M = K_{x(y)} F \Delta x(y)_{cp} \tau$$

$$M = K_{x(y)} F \Delta x(y)_{cp}$$

В основное уравнение массопередачи входит кинетический коэффициент массопередачи, который показывает, какое количество вещества переходит из одной фазы в другую в единицу времени через единицу поверхности раздела фаз при движущей силе равной 1. Уравнение массопередачи применяют для определения поверхности контакта фаз и размера массообменных аппаратов.

Величина поверхности контакта фаз в процессах со свободной границей зависит от гидродинамического режима.

Для процессов абсорбции, десорбции, перегонки, ректификации, жидкостной экстракции характерна свободная граница раздела фаз.

Основное сопротивление переносу массы в движущемся потоке оказывает пограничный слой.

В ламинарном потоке пограничный слой увеличивается и заполняет все сечение потока.

Конвективный перенос идет в направлении, параллельном движению потока, а перенос к границе раздела фаз определяется молекулярной диффузией в случае ламинарного режима.

Уравнение массоотдачи:

$$M = (x_{гр} - x) F \tau$$

$$M = \beta_y (y - y_{tr}) F \tau$$

Коэффициент массоотдачи β_x (β_y) показывает, какое количество вещества переходит от единицы поверхности раздела фаз в ядро потока или наоборот в единицу времени при движущей силе равной 1.

Коэффициент массоотдачи характеризует скорость переноса вещества внутри фазы конвекцией и молекулярной диффузией одновременно.

На границе раздела фаз отсутствует сопротивление процессу, равновесие устанавливается очень быстро.

Диффузионный критерий Нуссельта характеризует отношение скорости переноса вещества конвективной и молекулярной диффузией к молекулярному переносу.

Выражение для диффузионного критерия Нуссельта:

$$Nu' = \beta l / D$$

Диффузионный критерий Фурье характеризует условия подобия неустановившихся процессов теплоотдачи.

Диффузионный критерий Фурье является аналогом критерия гомохронности и теплового критерия Фурье.

Выражение для диффузионного критерия Фурье:

$$Fo' = D \tau / l^2$$

Диффузионный критерий Пекле характеризует соотношение между интенсивностью переноса вещества конвекцией и молекулярной диффузией.

Выражение для диффузионного критерия Пекле:

$$Pe' = w l / D$$

Диффузионный критерий Пекле представляют в виде произведения следующих безразмерных комплексов:

$$Pe' = Re Pr'$$

Диффузионный критерий Прандтля характеризует подобие физических свойств.

Диффузионный критерий Прандтля:

$$Pr' = \nu / D$$

Диффузионный критерий Нуссельта является определяемым.

Критериальное уравнение массоотдачи:

$$f(Re, Fo', Nu', Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots) = 0$$

$$Nu' = f(Fo', Re, Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Для установившегося процесса массоотдачи критериальное уравнение:

$$f(Nu', Re, Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots) = 0$$

$$Nu' = f(Re, Pr', \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Уравнение аддитивности фазовых сопротивлений:

$$K_y = 1 / (1/\beta_y + m/\beta_x)$$

$$K_x = 1 / (1/\beta_y m + 1/\beta_x)$$

В уравнении аддитивности фазовых сопротивлений знаменатель представляет собой суммарное фазовое сопротивление.

Коэффициент массопередачи находят по уравнению аддитивности фазовых сопротивлений.

Относительное движение фаз влияет на процесс массообмена.

Схема относительного движения, при которой фазы движутся в одном и том же направлении – прямоток.

Схема относительного движения, при которой фазы движутся в противоположных направлениях – противоток.

Относительное движение фаз на величину движущей силы процесса массообмена влияет.

Движущая сила процесса массопередачи:

$$\Delta y_{cp} = (\Delta y_b - \Delta y_m) / \ln (\Delta y_b / \Delta y_m)$$

Примерные варианты для самостоятельной подготовки к тестированию

ВАРИАНТ 1

1: На жидкость, находящуюся в состоянии движения или покоя, действуют

- : объемные силы
- : внешние силы
- : внутренние силы
- : поверхностные силы

2: Уравнение расхода жидкости

- : $M = wS$
- : $Q = wS$
- : $M = wS\rho$
- : $Q = wS\rho$
- : $Q = wSg$

3: ### - удельная (отнесенная к единице объема) масса, энергия или количество движения

4: Основное уравнение переноса субстанции

- : $\theta\varphi/\theta\tau = \operatorname{div} \vec{q} + \gamma$
- : $\theta\varphi/\theta\tau = \operatorname{div} \vec{q} - \gamma$
- : $\theta\varphi/\theta\tau = -\operatorname{div} \vec{q} + \gamma$
- : $\theta\varphi/\theta\tau = \operatorname{div} \vec{q} - \gamma$
- : $d\varphi/d\tau = -\operatorname{div} \vec{q} + \gamma$

5: Дифференциальное уравнение теплопроводности в неподвижной среде (уравнение Фурье)

$$\theta t/\theta\tau + w \operatorname{grad} t = a \left(\frac{\theta t}{\theta x} + \frac{\theta t}{\theta y} + \frac{\theta t}{\theta z} \right)$$

-:

$$\theta t/\theta\tau = a \left(\frac{\theta t}{\theta x} + \frac{\theta t}{\theta y} + \frac{\theta t}{\theta z} \right)$$

-:

$$dt/d\tau = a \left(\frac{\theta^2 t}{\theta x^2} + \frac{\theta^2 t}{\theta y^2} + \frac{\theta^2 t}{\theta z^2} \right)$$

-:

$$dt/d\tau = a \left(\frac{\theta t}{\theta x} + \frac{\theta t}{\theta y} + \frac{\theta t}{\theta z} \right)$$

-:

$$\theta t/\theta\tau = a \left(\frac{\theta^2 t}{\theta x^2} + \frac{\theta^2 t}{\theta y^2} + \frac{\theta^2 t}{\theta z^2} \right)$$

-:

6: Интегралом дифференциальных уравнений движения Эйлера для установившегося потока является уравнение ###

7: ### - исследование объектов познания на их моделях

8: $D_1/D_2=L_1/L_2=l_1/l_2=\dots=a_1=\text{const}$

- : константа геометрического подобия
- : критерий геометрического подобия
- : масштабный множитель
- : симплекс геометрического подобия
- : инвариант подобия

9: В зависимости от соотношения размеров модели и натуры инварианты подобия

- : не изменяются
- : изменяются
- : увеличиваются
- : уменьшаются

10: Если константы подобия найдены из условий однозначности, то образованные из них критерии называют ###

11: Критерий ###, характеризующий влияние перепада гидростатического давления на движение жидкости

12: Критерий Фруда

- : $Fr = w^2/gl^2$
- : $Fr = w^2/gl$
- : $Fr = w/gl^2$
- : $Fr = w^2/g^2l$
- : $Fr = w/g^2l$

13: В аппарате идеального ### частицы потока движутся параллельно друг другу с одинаковой скоростью, поперечное и продольное перемешивание отсутствуют

14: Основой ### модели является модель идеального вытеснения, осложненная обратным перемешиванием

15: Критерий подобия Пекле

- : $Pe_L = wL/D_L$
- : $Pe_L = wL/D$
- : $Pe_L = wd/D_L$
- : $Pe_L = wd/D$
- : $Pe_L = w/D_L$

16: Величина $p/(\rho g)$

- : геометрический напор
- : гидродинамический напор
- : гидростатический напор
- : пьезометрический напор

17: Выражение закона Паскаля

- : $\Delta p = \rho g(z_1 - z_2)$
- : $p = \rho g(z_1 - z_2)$
- : $p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2)$

-: $p_2 = p_1 + \rho g z$

-: $p_2 = p_1 - \rho g(z_1 - z_2)$

18: Удельная кинетическая энергия в данном сечении (точке) потока или динамический напор

-: $w^2/(2g)$

-: $p/(\rho g)$

-: $z + p/(\rho g)$

-: $z - p/(\rho g)$

-: $z + p/(\rho g) + w^2/(2g)$

19: Потери давления на трение при турбулентном режиме пропорциональны

-: $w^{1,5}$

-: w^2

-: $w^{1,75}$

-: $w^{1,2}$

-: w

20: В трубопроводе диаметром 96*3,5 мм течет вода, расход которой 3,6 м³/ч. Вязкость воды $1 \cdot 10^{-3}$ Па*с. Критерий Рейнольдса равен

-: 141,7

-: 1417

-: 14170

-: 141700

ВАРИАНТ 1

1: Процессы, скорость которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты, называют ###

2: Процесс распространения энергии с помощью электромагнитных колебаний – это

-: теплопроводность

-: теплоотдача

-: тепловое излучение

-: конвекция

-: теплопередача

3: При нестационарном процессе теплопередачи температура

-: изменяется во времени

-: не изменяется в пространстве

-: изменяется в пространстве

-: не зависит от времени

-: постоянна

4: В основное уравнение теплопередачи коэффициент

-: теплоотдачи

-: кинетический

-: теплопроводности

-: сопротивления

-: теплопередачи

5: Величина δ/λ характеризует

-: интенсивность теплового потока

-: скорость теплового потока

- : термическое сопротивление стенки
- : тепловую проводимость стенки
- : теплоотдачу в стенке

6: Начальная температура воды 10⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 124 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31⁰С

- : 116,53 кг/ч
- : 1165,3 кг/ч
- : 11,653 кг/ч
- : 11653 кг/ч

7: Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 30 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45⁰С, внутренней 175⁰С. Коэффициент теплопроводности изоляции 0,116 Вт/ мК. Количество теплоты, теряемое паропроводом с 1м².

- : 502,67 Вт
- : 50,2785,6 Вт
- : 5026,67 Вт
- : 50266,66 Вт

8: Коэффициент ### показывает, какое количество теплоты передается от теплоносителя к 1 м² стенки в единицу времени при разности температур между теплоносителем и стенкой в 1 град

9: Выражение для критерия Фурье

- : $Fo = \alpha \tau / l^2$
- : $Fo = \alpha^2 \tau^2 / l$
- : $Fo = - \alpha \tau / l^2$
- : $Fo = - \alpha^2 \tau^2 / l$

10: Критериальное уравнение теплоотдачи

- : $f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr, Re) = 0$
- : $f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr, Re) = const$
- : $Nu = f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re)$
- : $f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr) = 0$
- : $f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re) = 0$

11: Критерий Фруда может быть исключен из критериального уравнения в случае

- : вынужденной теплоотдачи
- : естественной теплоотдачи
- : теплопроводности
- : теплового излучения

12: Критерий Галилея

- : $Ga = g l^3 / \mu^2$
- : $Ga = g l / \nu^2$
- : $Ga = g l^3 / \nu^2$
- : $Ga = g l^3 / \nu$
- : $Ga = g l / \nu$

13: Конденсацию пара, при которой на хорошо смачиваемых поверхностях капли конденсата образуют жидкую пленку, стекающую вниз под действием силы тяжести, называют ###

14: Явление ### состоит в том, что перенос теплоты происходит путем непосредственного соприкосновения между микрочастицами

15: Перенос теплоты от более нагретой среды к менее нагретой через разделяющую их стенку называют

- : теплопроводностью
- : теплоотдачей
- : теплопередачей
- : тепловым излучением
- : конвекцией

16: Геометрическое место всех точек с одинаковой температурой представляет собой ### поверхность

17: Тепловой поток Q определяют по уравнениям теплового баланса

- : $Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н})$
- : $Q = G_1 (H_{1н} - H_{1к}) t = G_2 (H_{2к} - H_{2н}) t$
- : $Q = G_1 (H_{1н} - H_{1к}) = G_2 (H_{2к} - H_{2н})$
- : $Q = (H_{1н} - H_{1к}) t = (H_{2к} - H_{2н}) t$
- : $Q = G_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 (t_{2к} - t_{2н})$

18: Расчет скорости теплоотдачи осуществляют с помощью

- : уравнения теплопроводности Фурье
- : уравнения теплоотдачи
- : уравнения теплопередачи
- : уравнения Эйлера
- : закона охлаждения Ньютона

19: Критерий Фурье является аналогом

- : критерия гомохронности
- : критерия Рейнольдса
- : критерия Фруда
- : критерия Эйлера

20: Критерий ### характеризует отношение суммарного переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью к теплоте, передаваемой теплопроводностью

ВАРИАНТ 2

- 1:** Аппараты, в которых осуществляются тепловые процессы, называют ###
- 2:** Перенос теплоты вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов жидкости или газа - явление
- : теплопроводности
 - : теплоотдачи
 - : конвекции
 - : теплового излучения
 - : теплопередачи
- 3:** Необходимым условием теплопередачи является
- : постоянство температур
 - : равенство температур
 - : неравенство температур
 - : повышение температуры
 - : понижение температуры
- 4:** Тепловой поток Q определяют по уравнениям теплового баланса
- : $Q = G_1(H_{1н} - H_{1к})t = G_2(H_{2к} - H_{2н})t$
 - : $Q = G_1c_1(t_{1н} - t_{1к}) = G_2c_2(t_{2к} - t_{2н})$
 - : $Q = (H_{1н} - H_{1к})t = (H_{2к} - H_{2н})t$
 - : $Q = G_1(t_{1н} - t_{1к}) = G_2(t_{2к} - t_{2н})$
 - : $Q = G_1(H_{1н} - H_{1к}) = G_2(H_{2к} - H_{2н})$
- 5:** Для многослойной стенки общее термическое сопротивление равно
- : сумме термических сопротивлений отдельных слоев
 - : разности термических сопротивлений отдельных слоев
 - : разности коэффициентов теплопроводности
 - : сумме коэффициентов теплопроводности
- 6:** Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 75 мм. Температура стенки аппарата 146°C , наружной поверхности изоляции 40°C . Поверхность теплопередачи 40 м^2 , коэффициент теплопроводности асбеста $0,151\text{ Вт/мК}$. Потери теплоты через слой изоляции
- : $85,6\text{ Вт}$
 - : $856,653\text{ Вт}$
 - : $8536,53\text{ Вт}$
 - : $85365,3\text{ Вт}$
- 7:** Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 60 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45°C , внутренней 175°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,116\text{ Вт/мК}$. Количество теплоты, теряемое паропроводом с 1 м^2 .
- : $25,13\text{ Вт}$
 - : $251,33\text{ Вт}$
 - : $2513,33\text{ Вт}$
 - : $25133,33\text{ Вт}$
- 8:** Зависимости для расчета скорости процесса теплоотдачи получают
- : решая дифференциальные уравнения
 - : подбирая коэффициенты
 - : используя экспериментальные данные
 - : преобразованием дифференциальных уравнений методом теории подобия
- 9:** Выражение для критерия Пекле
- : $Pe = wl/\alpha$
 - : $Pe = wl/\alpha^2$
 - : $Pe = -wl/\alpha^2$
 - : $Pe = -wl/\alpha$
- 10:** Для установившегося процесса теплоотдачи критериальное уравнение
- : $f(Nu, Pe, Fr, Re) = \text{const}$

-: $f(Nu, Pe, Fr, Re) = 0$

-: $Nu = f(Pe, Fr, Re)$

-: $f(Nu, Pe, Fr) = 0$

-: $f(Pe, Ho, Fr, Re) = 0$

11: Критерий #### отражает действие сил тяжести

12: Теплоотдача при конденсации насыщенных паров протекает

-: при переменной температуре

-: при постоянной температуре

-: в открытой системе

-: в закрытой системе

-: в замкнутой системе

13: Конденсацию пара, при которой на несмачиваемых поверхностях капли конденсата не образуют жидкую пленку, называют ###

14: Критерий ### характеризует условия подобия неустановившихся процессов теплоотдачи

15: Уравнение теплоотдачи

-: $Q = \lambda(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F\tau$

-: $Q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})\tau$

-: $Q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F\tau$

-: $Q = -\alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F\tau$

16: Величина λ/δ характеризует

-: термическое сопротивление стенки

-: интенсивность теплового потока

-: тепловую проводимость стенки

-: скорость теплового потока

-: теплоотдачу в стенке

17: Основное уравнение теплопередачи

-: $Q = KF\Delta t_{\text{ср}}\tau$

-: $Q = \alpha F\Delta t_{\text{ср}}\tau$

-: $Q = KF\Delta t_{\text{ср}}$

-: $Q = -KF\Delta t_{\text{ср}}\tau$

-: $Q = \lambda F\Delta t_{\text{ср}}\tau$

18: При стационарном процессе теплопередачи температура

-: изменяется в пространстве

-: не зависит от времени

-: не изменяется в пространстве

-: изменяется во времени

-: постоянна

19: Теплопроводность в подвижных средах при турбулентном режиме движения имеет значение

-: по всему сечению потока

-: на входе в аппарат

-: в тонком пограничном слое

-: на выходе из аппарата

-: в центре потока

20: Выражение для критерия Нуссельта

-: $Nu = -\alpha l / \lambda$

-: $Nu = -wl / \alpha^2$

-: $Nu = wl / \alpha$

-: $Nu = \lambda / \alpha l$

1: Явление #### состоит в том, что перенос теплоты происходит путем непосредственного соприкосновения между микрочастицами

2: Перенос теплоты от более нагретой среды к менее нагретой через разделяющую их стенку называют

- : теплопроводностью
- : теплоотдачей
- : тепловым излучением
- : теплопередачей
- : конвекцией

3: Геометрическое место всех точек с одинаковой температурой представляет собой #### поверхность

4: Коэффициент #### показывает, какое количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному за 1 с через 1 м² стенки при разности температур между теплоносителями 1 град.

5: Начальная температура воды 10⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 1240 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31⁰С

- : 11,653 кг/ч
- : 116,53 кг/ч
- : 1165,3 кг/ч
- : 11653 кг/ч

6: Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 150 мм. Температура стенки аппарата 146⁰С, наружной поверхности изоляции 40⁰С. Поверхность теплопередачи 40м², коэффициент теплопроводности асбеста 0,151 Вт/ мК. Потери теплоты через слой изоляции

- : 42,68 Вт
- : 426,83 Вт
- : 4268,27 Вт
- : 42682,67 Вт

7: Уравнение теплоотдачи

- : $Q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F\tau$
- : $Q = \lambda(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F\tau$
- : $Q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})\tau$
- : $Q = -\alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F\tau$

8: Критерий #### характеризует условия подобия неустановившихся процессов теплоотдачи

9: Выражение для критерия Фурье

- : $Fo = \alpha^2 \tau^2 / l$
- : $Fo = - \alpha \tau / l^2$
- : $Fo = - \alpha^2 \tau^2 / l$
- : $Fo = \alpha \tau / l^2$

10: Критерий #### характеризует отношение суммарного переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью к теплоте, передаваемой теплопроводностью

11: Критерий Пекле представляют в виде произведения следующих безразмерных комплексов

- : $Pe = NuRe$
- : $Pe = NuFr$
- : $Pe = RePr$
- : $Pe = PeFr$

12: Критерий Фруда

- : $Fr = w / (gl)$
- : $Fr = -w^2 / (gl)$

- : $Fr = w^2/(gl)$
- : $Fr = -w/(gl)$
- : $Fr = w^2/(gv)$
- : $Fr = w/(gv)$

13: При конденсации насыщенных паров происходит одновременный перенос теплоты и

- : импульса
- : массы
- : скорости
- : энергии

14: Критериальное уравнение теплоотдачи

- : $f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr, Re) = \text{const}$
- : $f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr) = 0$
- : $Nu = f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re)$
- : $f(Fo, Pe, Ho, Fr, Re) = 0$
- : $f(Fo, Nu, Pe, Ho, Fr, Re) = 0$

15: Расчет скорости теплоотдачи осуществляют с помощью

- : уравнения теплопроводности Фурье
- : закона охлаждения Ньютона
- : уравнения теплоотдачи
- : уравнения теплопередачи
- : уравнения Эйлера

16: Основное уравнение теплопередачи

- : $Q = KF\Delta t_{cp}$
- : $Q = \alpha F\Delta t_{cp}\tau$
- : $Q = KF\Delta t_{cp}\tau$
- : $Q = -KF\Delta t_{cp}\tau$
- : $Q = \lambda F\Delta t_{cp}\tau$

17: При нестационарном процессе теплопередачи температура

- : не изменяется в пространстве
- : изменяется во времени
- : не зависит от времени
- : изменяется в пространстве

18: В неподвижных средах и при ламинарном режиме движения при отсутствии излучения ### единственный способ передачи теплоты

19: Уравнение теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплопередачи

- : $q = \lambda(t_{ct.1} - t_{ct.2})/\delta$
- : $Q = -\lambda(t_{ct.1} - t_{ct.2})F\tau/\delta$
- : $Q = \lambda(t_{ct.1} - t_{ct.2})F\tau/\delta$
- : $Q = \lambda(t_{ct.1} - t_{ct.2})\tau/\delta$
- : $Q = \lambda(t_{ct.1} - t_{ct.2})/\delta$

20: При естественной конвекции критерий Фруда заменяют производным критерием ###

ВАРИАНТ 4

- 1:** Аппараты, в которых осуществляются тепловые процессы, называют ###
- 2:** Теплопроводность в подвижных средах при турбулентном режиме движения имеет значение
- : в тонком пограничном слое
 - : по всему сечению потока
 - : на входе в аппарат
 - : на выходе из аппарата
 - : в центре потока
- 3:** Перенос теплоты вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов жидкости или газа - явление
- : конвекции
 - : теплопроводности
 - : теплоотдачи
 - : теплового излучения
 - : теплопередачи
- 4:** Вещества, участвующие в теплопередаче, называют ###
- 5:** При нестационарном процессе теплопередачи температура
- : изменяется в пространстве
 - : изменяется во времени
 - : не изменяется в пространстве
 - : не зависит от времени
 - : постоянна
- 6:** Мерой интенсивности изменения температуры в данной точке является
- : разность температур
 - : температурное поле
 - : температурный градиент
 - : температура в данной точке
 - : изменение теплового потока
- 7:** Уравнение теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплопереноса
- : $Q = \lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})F\tau/\delta$
 - : $q = \lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})/\delta$
 - : $Q = -\lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})F\tau/\delta$
 - : $Q = \lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})\tau/\delta$
 - : $Q = \lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})/\delta$
- 8:** Начальная температура воды 5⁰С, конечная – 25⁰С. Теплоемкость воды 4190 Дж/кгК. Расход азота 1240 м³/ч, плотность азота 1,25 кг/м³, теплоемкость азота 1050 Дж/кгК. Количество воды, необходимое для охлаждения азота от 76 до 31⁰С
- : 874 кг/ч
 - : 8740 кг/ч
 - : 87,4 кг/ч
 - : 1648 кг/ч
- 9:** Аппарат покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 75 мм. Температура стенки аппарата 146⁰С, наружной поверхности изоляции 40⁰С. Поверхность теплопередачи 10м², коэффициент теплопроводности асбеста 0,151 Вт/мК. Потери теплоты через слой изоляции
- : 2134,13 Вт
 - : 21,34 Вт
 - : 213,41 Вт
 - : 21341,33 Вт
- 10:** Расчет скорости теплоотдачи осуществляют с помощью
- : уравнения теплоотдачи

- : уравнения теплопроводности Фурье
- : уравнения теплопередачи
- : закона охлаждения Ньютона
- : уравнения Эйлера

11: Критерий Фурье является аналогом

- : критерия Рейнольдса
- : критерия Фруда
- : критерия Эйлера
- : критерия гомохронности

12: Выражение для критерия Пекле

- : $Pe = wl/\alpha^2$
- : $Pe = wl/\alpha$
- : $Pe = -wl/\alpha^2$
- : $Pe = -wl/\alpha$

13: Выражение для критерия Нуссельта

- : $Nu = -\alpha l/\lambda$
- : $Nu = -wl/\alpha^2$
- : $Nu = \alpha l/\lambda$
- : $Nu = \alpha / wl$
- : $Nu = wl/\lambda$

14: Для установившегося процесса теплоотдачи критериальное уравнение

- : $f(Nu, Pe, Fr, Re) = 0$
- : $f(Nu, Pe, Fr, Re) = \text{const}$
- : $Nu = f(Pe, Fr, Re)$
- : $f(Nu, Pe, Fr) = 0$
- : $f(Pe, Ho, Fr, Re) = 0$

15: Критерий #### характеризует подобие физических свойств теплоносителей

16: Критерий #### отражает действие сил тяжести

17: При естественной конвекции критерий Фруда заменяют производным критерием ####

18: При естественной конвекции критерий Фруда заменяют производным критерием ####

19: При конденсации насыщенных паров перенос теплоты определяется

- : теплопроводностью
- : теплоотдачей
- : теплотой парообразования
- : теплопередачей
- : скоростью конденсации

20: Конденсацию пара, при которой на хорошо смачиваемых поверхностях капли конденсата образуют жидкую пленку, стекающую вниз под действием силы тяжести, называют ####

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ и ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания Процессы и аппараты

по выполнению курсовых работ
для студентов направления подготовки
18.03.01 Химическая технология
Направленность (профиль) Химический инжиниринг и цифровые технологии

Ставрополь
2026

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы, включают порядок выполнения, оформления и защиты работы.

Выполнение курсовой работы является неотъемлемой частью подготовки студентов по дисциплине «Процессы и аппараты».

Выполнение курсовой работы (проекта) имеет целью расширение знаний студентов теоретических основ типовых химико-технологических процессов; отработку навыков самостоятельного применения теоретических знаний к комплексному решению профессиональных задач, использования справочной литературы, методов математической обработки экспериментальных данных, компьютерных технологий..

Курсовая работа является частью научно-исследовательской работы студента и имеет целью закрепление студентом навыков самостоятельного выполнения фундаментальных и прикладных работ поискового, теоретического и экспериментального направления, работы с оригинальной литературой – монографиями, статьями в научных журналах, работы с реферативной литературой, а также представления материала в общепринятой форме научного отчета.

Тематика курсовых работ.

Одним из важных компонентов при выполнении курсовой работы является определение тематики. Тематика курсовых работ является актуальной, отвечает учебным задачам дисциплин, а также потребностям науки и практики. Актуальность тематики курсовых работ обусловлена научностью, современностью и направленностью к получению студентами навыков самостоятельной творческой и научно-исследовательской работы.

Темы курсовых работ (проектов) являются комплексными, т.е. содержат ряд взаимосвязанных между собой проблем и опираются на фактический материал профильных предприятий и учреждений химического профиля, а также на итоги НИР студентов, на научные работы членов кафедры, студен-

ческих научных кружков и проблемных групп; используют новейшие достижения отечественной и зарубежной науки, актуальные прикладные аспекты.

Темы курсовых работ (проектов) утверждаются на заседании кафедры, в течение 2-х недель после начала семестра, затем распоряжением факультета об утверждении тем курсовых работ (проектов).

Основные содержательные и процессуальные аспекты, необходимые для выполнения работы, оформляются кафедрой в заданиях по курсовому проектированию. В заданиях четко формулируется тема работы (проекта) и требования, определяющие ее объем, содержание, а также исходные данные.

Научно-исследовательскую работу по темам курсовых проектов студент выполняет в лабораториях кафедры. Работать с научной литературой студент может в библиотеке СКФУ.

Каждый обучающийся имеет доступ к базам данных и библиотечным фондам. Для самостоятельной подготовки к курсовому проектированию обучающиеся обеспечены доступом к сети Интернет.

Библиотечный фонд укомплектован печатными и/или электронными изданиями основной учебной литературы по всем дисциплинам, изданными за последние 5 лет. Фонд дополнительной литературы помимо учебной включает официальные справочно-библиографические и периодические издания.

Каждому обучающемуся обеспечен доступ к комплектам библиотечного фонда, состоящего из отечественных и зарубежных журналов из следующего перечня:

1. Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология
2. Нанотехнологии: разработка, применение - ххi век
3. Нефтехимия
4. Российские нанотехнологии
5. Успехи химии
6. Химия природных соединений

В СКФУ обеспечивается доступ к современным информационным ресурсам:

- Росстата – www.gks.ru;
- электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн» – www.biblioclub.ru;
- электронно-библиотечная система «Лань» – e.lanbook.com;
- научная электронная библиотека e-Library – elibrary.ru

Содержание и структура курсовых работ (проектов)

Курсовая работа (проект) должна содержать элементы новизны, наряду с фундаментальным аспектом должен быть проведен анализ современного состояния изучаемой проблемы. В связи с чем, задание по курсовой работе (проекту) индивидуализировано с учетом интересов и способностей студентов.

Курсовая работа (проект) должна состоять из введения, теоретической части, эмпирической (практической) части, заключения, списка литературы и приложения. В отдельных случаях, в соответствии с тематикой работы (проекта), эмпирическая часть может отсутствовать.

Титульный лист оформляется в соответствии с Положением об организации и выполнении курсовых работ (проектов) в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования; отражаются объект, предмет, задачи, цели, методы, новизна, теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая часть должна содержать анализ состояния изучаемой проблемы на основе обзора научной, научно-информационной, справочной литературы. Представленный материал должен быть логически связан с целью исследования. В параграфах теоретической части необходимо отражать отдельные компоненты проблемы и завершать их выводами.

Эмпирическая (практическая) часть включает описание системы экспериментального исследования, обоснование методов исследования, анализ результатов экспериментального исследования, схемы, графические и математические способы интерпретации полученных данных, выводы.

Заключение содержит выводы, подтверждающие или опровергающие первоначальные предположения (гипотезы), перспективы дальнейшего изучения проблемы, связь с практикой, анализ реализации целей и задач исследования.

Список литературы должен быть составлен в соответствии с требованиями ГОСТа к оформлению библиографии.

Приложение содержит весь фактический материал экспериментальных исследований (схемы, чертежи, расчетные материалы, рисунки и т.д.).

Курсовую работу(проект) рекомендуется представлять в объеме 1–2 печатных листа. Текст работы должен быть напечатан через 1,5 интервала на одной стороне стандартного листа белой бумаги (А-4). Текст и другие отпечатанные элементы работы должны быть черными, контуры букв и знаков четкими, без ореола и затенения. Шрифт Times New Roman, кегель 14. Названия глав и параграфов выделяются полужирным шрифтом. Лист с текстом должен иметь поля: слева –30 мм, справа –10 мм, сверху –20 мм, снизу –20 мм. Нумерация страниц текста делается в правом нижнем углу листа. Проставлять номер страницы необходимо со страницы, где печатается «Введение», на которой ставится цифра «3».После этого нумеруются все страницы, включая приложения.

Между названием главы и названием параграфа этой главы ставится пробел равный двум интервалам, а название параграфа не должно отделяться от текста этого параграфа пробелом. Названия параграфов отделяются от текста предыдущего параграфа пробелом, равным двум интервалам. Каждая глава, а также введение, выводы, приложения и список использованной литературы начинаются с новой страницы. Слово «Глава» не пишется. Главы имеют порядковые номера в пределах всей работы, обозначаемые арабскими

цифрами (например: 1,2,3), после которых ставится точка. Слово «параграф» или значок параграфа в названии не ставятся. Параграфы имеют порядковые номера в пределах глав, обозначаемые арабскими цифрами (например: 1.1. и 1.2.). Заголовки глав и параграфов в тексте работы должны располагаться по центру, точку в конце названия главы и параграфа не ставят. Не допускается переносить часть слова в заголовке.

Нумерация таблиц и рисунков может быть сквозной или соотноситься с номером главы и параграфа. Например, если таблица или рисунок включены в текст первого параграфа второй главы, нумерация следующая: Таблица 2.1.1., рис. 2.1.1. Последняя цифра означает порядковый номер таблицы (или рисунка) в данном параграфе. Таблица помещается в качестве следующей страницы после первого упоминания о ней в тексте.

Курсовая работа складывается из нескольких частей

Первая часть курсовой работы заключается в написании литературного обзора на тему, определяемую преподавателем и связанную с выполняемой студентом синтетической частью работы. Соответствующая литература может быть рекомендована преподавателем или самостоятельно найдена студентом.

Вторая часть курсовой работы заключается в отыскании имеющихся в мировой химической (справочной и реферативной) литературе.

Третья часть заключается в анализе или выполнении работы. Эта часть работы может выполняться полностью или частично в учебное время. Итогом этой части работы является сдача преподавателю теоретического материала .

Отчет по курсовой работе должен состоять из следующих частей:

1. *Введение*, в котором излагается цель работы и сообщаются сведения о некоторых свойствах изучаемого или синтезируемого вещества (или класса соединений, к которому оно принадлежит), обуславливающих проявляемый к нему интерес. Введение должно быть кратким и наглядно демонстрировать зачем проводилась эта работа;

2. *Литературный обзор*, в котором приводятся и обсуждаются литературные данные по теме работы. При подборе литературы можно использовать учебники, монографии или обзорные статьи, где имеются ссылки на литературу. Литературный обзор не должен быть формальной сводкой литературы. Необходимо критически проанализировать литературные данные и на этой основе сформулировать выводы, отражающие соответствующую сравнительную оценку рассматриваемых свойств и методов синтеза.

Литературный материал настоятельно рекомендуется иллюстрировать схемами реакций.

Следует применять сквозную нумерацию ссылок по всей работе – от первой и до последней. Это означает, что при повторном цитировании какой-либо работы сохраняется тот номер ссылки, каким она была обозначена при первом упоминании. Ссылки на литературу в тексте следует давать в квадратных скобках, например [2], либо в виде надстрочного индекса, например². Если по какой-либо причине удалось ознакомиться с работой лишь по реферату, то ссылка должна обязательно последовательно указывать как оригинальную статью, так и реферативный журнал, в котором помещен реферат;

3. *Обсуждение полученных результатов* посвящается описанию выполненной работы и обсуждению полученных результатов. Построение этой части определяется спецификой работы и соображениями автора о наиболее оптимальном варианте подачи материала. Раздел завершается обсуждением полученных результатов в сопоставлении с литературными данными;

4. *Экспериментальная часть*¹

При оформлении этой части работы следует руководствоваться правилами принятыми для публикации статей в журнале,

Список использованной литературы нумеруется в порядке упоминания в тексте и печатается с указанием инициалов и фамилий всех авторов. Все ссылки даются в оригинальной транскрипции; иероглифические тексты мо-

¹ В соответствии с правилами журнала Химия гетероциклических соединений
http://www.osi.lv/hgs/Pravila_HGS_2014-09_published.pdf

гут цитироваться как в русской (см. *Реферативный журнал Химии*), так и в латинской (см. *Chemical Abstracts*) транскрипции, но единообразно. Предпочтительнее латинская.

Книги. При обсуждении частных вопросов следует указывать конкретную страницу.

Общая органическая химия; Бартон, Д.; Оллис, У. Д., Ред.; Химия: Москва, 1985, т. 9, с. 45.

Трофимов, Б. А.; Михалева, А. И.; Шмидт, Е. Ю.; Собенина, Л. Н. Химия пиррола. Новые страницы; Толстиков, Г. А., Ред.; Наука: Новосибирск, 2012.

Bioactive Heterocycles: Synthesis and Biological Evaluation; Ameta, K. L.; Pawar, R. P.; Domb, A. J., Eds.; Nova Science Publishers Inc., 2013, p. 97.

Статьи в сборниках и справочниках.

Краснов, К. А. В кн. Избранные методы синтеза и модификации гетероциклов, Карцев, В.Г., Ред.; IBS Press, Москва, 2003, т. 1, с. 314.

Gulevskaya, A. V.; Pozharskii, A. F. In *Advances in Heterocyclic Chemistry*,

Katritzky, A. R., Ed.; Elsevier: New York, 2007, vol. 93, p. 57.

Hulme, C. In *Multicomponent Reactions*, Zhu, J.; Bienaymé, H., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2005, p. 311.

Статьи в журналах. Для журналов со сквозной пагинацией тома или за год

номер выпуска не указывается. При цитировании статьи из журнала, который

переводится на английский язык, сначала дается ссылка на переводную (английскую) версию, а в квадратных скобках ссылка на оригинальную версию.

1. Uchuskin, M. G.; Makarov, A. S.; Butin, A. V. *Chem. Heterocycl. Compd.* 2014, 50, 791. [Химия гетероцикл. соединений 2014, 860.]

2. По полисопряженным структурам см.: (a) Wang, C.; Dong, H.; Hu, W.; Liu, Y.; Zhu, D. Chem. Rev. 2012, 112, 2208. (b) Anthony, J. E. Angew. Chem., Int. Ed. 2008, 47, 452. (c) Thompson, B. C.; Fréchet, J. M. J. Angew. Chem., Int. Ed. 2008, 47, 58.

3. Лукевиц, Э.; Ерчак, Н. П.; Демичева, Л. Е. Хим.-фарм. журн. 1992, 26(1), 45.

4. Котов, В. Ю.; Никольский, А. Б.; Попов, А. М. Вестн. ЛГУ 1985, 25, вып. 4, 39.

5. Kahveci, B.; Menteşe, E.; Özil, M.; Ülker, S.; Ertürk, M. Monatsh. Chem. DOI:

10.1007/s00706-012-0916-0.

6. Sato, T. Yakugaku Zasshi 1957, 77, 771; Chem. Abstr. 1957, 51, 17941.

Авторские свидетельства, патенты. Ссылаясь на патент или авторское свидетельство, необходимо указать инициалы и фамилии изобретателей, номер патента, а также желательно указать номер цитирования в Chemical Abstracts.

Насакин, О. Е.; Николаев, Е. Г. А. с. СССР 1168554; Бюл. изобрет. 1985, № 27, 90.

Slade, R.; Klimova, Y.; Halter, R. J.; Yungai, A. J.; Weiner, W. S.; Walton, R. J.; Willardsen, J. A.; Anderson, M. B.; Zavitz, K. US Patent 2008249135.

Dunbar, J. E.; Zemba, J. W. US Patent 4764608; Chem. Abstr. 1994, 100, 14852.

Авторефераты и диссертации.

Майборода, Д. А. Автореф. дис. канд. хим. наук, Москва, 1998.

Родиновская, Л. А. Дис. докт. хим. наук, Москва, 1994.

Brines, J. L. Ph. D. Thesis, Rockefeller University: New York, 1989.

Для диссертаций можно указывать адрес сайта в Интернете.

При описании эксперимента необходимо не допускать вульгаризмов..

Студент докладывает полученные результаты в течение 10 мин, излагая существо работы четко и ясно, иллюстрируя сказанное схемами и таблицами. Оценка за курсовую работу складывается из трех параметров. Первый: качество и объем выполненной экспериментальной работы; второй: качество оформления отчета о проделанной работе; третий: доклад и ответы на поставленные на защите вопросы.

Критерии оценивания компетенций

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он полностью владеет материалом, раскрыл цели и задачи научного исследования

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он владеет материалом, в раскрытии целей и задач, допущены неточности.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он не полностью владеет материалом по теме курсовой работы, цели и задачи не раскрыты полностью

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если не владеет материалами по теме курсовой работы.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.

Процедура проведения данного оценочного мероприятия осуществляется в соответствии Положением о выполнении и защите курсовых работ в СКФУ.

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить УК-1 и ОПК-3 компетенции.

При проверке задания, оцениваются последовательность и логичность выбора литературных источников, научных статей, патентов по теме курсовой работы,

- соблюдение правил техники безопасности;

- правильность подбора и выполнения методики;

При защите работы оцениваются:

- умение представить основные результаты исследования в виде отчета по данной проблематике;
- владение материалом по теме курсовой работы;
- соответствие проведенного исследования целям и задачам.