

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Химический факультет

УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана химического факультета,
Чл.-корр. РАН, профессор



/С.Н. Калмыков/

«30» августа 2019 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)
Избранные главы процессов и аппаратов химических технологий

Уровень высшего образования:
Магистратура

Направление подготовки (специальность):
04.04.01 Химия

Направленность (профиль) ОПОП:
Химическая технология

Форма обучения:
очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методической комиссией факультета
(протокол №3 от 13.05.2019)

Москва 2019

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 04.04.01 «Химия» (программа магистратуры) в редакции приказа МГУ от 30 августа 2019 г., №1033.

Год (годы) приема на обучение 2019/2020, 2020/2021

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП: вариативная часть ООП, блок ПД.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников). Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП (в форме компетенция – индикатор - ЗУВ) указано в Общей характеристике ОПОП.

Компетенция	Индикаторы достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<p>ПК-9.М Способен создавать модели технологических процессов, предлагать способы их верификации, проводить исследования в лабораторных и полупромышленных условиях для проверки корректности предлагаемых моделей</p>	<p>ПК-9.М.1 Предлагает модели для описания основных физических процессов, используемых в технологии</p>	<p>Знать: принципы физического моделирования процессов; Знать: основные уравнения движения жидкостей; Уметь: определять характер движения жидкостей и газов; Уметь: определять основные характеристики процессов тепло- и массопередачи;</p>
	<p>ПК-9.М.2 Рассчитывает основные параметры химико- технологического процесса</p>	<p>Знать: типовые процессы химической технологии, соответствующие аппараты и методы их расчета Уметь: рассчитывать параметры и выбирать аппаратуру для конкретного технологического процесса; Уметь: рассчитывать основные характеристики химико- технологического процесса, выбирать рациональную схему</p>
<p>ПК-10.М Способен проводить технологические и технические расчеты, разрабатывать проекты технических условий, технологических регламентов и стандартов для внедрения инновационных технологий</p>	<p>ПК-10.М.1 Рассчитывает параметры типовых узлов технологической схемы химического производства</p>	<p>Владеть: методами технологических расчетов отдельных узлов и деталей химического оборудования; Владеть: навыками проектирования типовых аппаратов химической промышленности; Владеть: методами определения рациональных технологических режимов работы оборудования.</p>
<p>СПК-2.М Способен применять знания основных принципов создания, процессов и аппаратов при разработке новых технологий получения композиционных материалов и продуктов малотоннажного синтеза</p>	<p>СПК-2.М.1 Применяет знания теоретических основ процессов и аппаратов химической технологии при решении практических задач</p>	<p>Знать: сущность основных понятий, терминов, определений, законов, способов расчёта основных процессов и аппаратов химической технологии; Знать: основы теории переноса импульса, тепла и массы; Знать: основы теории теплопередачи; Знать: основы теории массопередачи в системах со свободной и неподвижной границей раздела фаз.</p>

3. Объем дисциплины (модуля) составляет 4 зачетных единиц, всего **144** часа, из которых **88** часов составляет контактная работа магистранта с преподавателем (38 часов - занятия лекционного типа, 38 часа – занятия семинарского типа, 8 часов – индивидуальные консультации, 4 мероприятия промежуточной аттестации), **56** часов составляет самостоятельная работа магистранта.

4. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (*если есть*).
Должны быть освоены общие курсы «Математический анализ», «Общая физика» и «Физическая химия».

5. Образовательные технологии (отметить если применяется электронное обучение и дистанционные технологии).
Используются следующие технологии: лекции-демонстрации и интерактивные лекции. Преподавание дисциплины проводится в форме авторских курсов по программам, которые составлены на основе результатов исследований, полученных научными школами МГУ и РХТУ.

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических или астрономических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
Раздел 1. Предмет, зада-	4	2	2				4			

чи и роль курса ПАХТ.										
Раздел 2. Гидродинамика. Гидравлическое сопротивление трубопровода.	5	2	2				4	1		1
Раздел 3. Гидродинамика. Работа насоса на гидравлическую сеть.	5	2	2				4	1		1
Раздел 4. неподвижные зернистые слои и псевдооживленные слои.	5	2	2				4	1		1
Раздел 5. Разделение гетерогенных систем фильтрованием и осаждением.	7	2	2		2	(*)	6	1		1
Раздел 6. Теплообменные процессы. Общие вопросы теплопередачи.	6	2	2				4	2		2
Раздел 7. Теплопередача в поверхностных теплообменниках.	6	2	2				4	2		2
Раздел 8. Процесс выпаривания растворов.	6	2	2				4	2		2
Раздел 9. Выпарные аппараты.	8	2	2		2	(*)	6	2		2

Раздел 10. Массопередача с твёрдой фазой. Адсорбция.	4	2	2				4			
Раздел 11. Сушка твёрдых материалов.	6	2	2				4	2		2
Раздел 12. Кинетика конвективной сушки.	8	2	2		2	(*)	6	2		2
Раздел 13. Классификация и основные понятия процессов массообмена.	4	2	2				4			
Раздел 14. Процесс абсорбции.	6	2	2				4	2		2
Раздел 15. Расчёт абсорбционной колонны.	6	2	2				4	2		2
Раздел 16. Перегонка и ректификация.	6	2	2				4	2		2
Раздел 17. Расчёт ректификационной колонны.	10	3	3		2	(*)	8	2		2
Раздел 18. Жидкостная экстракция.	6	3	3				6			
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>	36					4	4			32

Итого	144	38	38		8	4	88	24		56
--------------	------------	-----------	-----------	--	----------	----------	-----------	-----------	--	-----------

(*) текущий контроль осуществляется во время семинарских занятий

Программа курса лекций:

1. Предмет, задачи и роль курса ПАХТ. Связь курса ПАХТ с другими техническими дисциплинами. Основные понятия и закономерности дисциплины ПАХТ. Классификация процессов. Непрерывные и периодические, стационарные и нестационарные процессы. Теоретический фундамент ПАХТ: законы сохранения массы, энергии и импульса; законы термодинамического равновесия; Законы переноса массы, энергии и импульса. Составление балансов на основе законов сохранения. Единицы измерения основных физических величин, системы единиц измерения: международная система единиц (СИ), система СГС и система МКГСС.
2. Основные понятия гидравлики. Гидростатика и гидродинамика. Классификация жидкостей в гидравлике. Уравнение неразрывности. Основные физические свойства жидкости и силы, действующие в жидкости. Уравнение Навье-Стокса, уравнение Эйлера, уравнение Бернулли. Гидродинамические режимы движения жидкостей: ламинарный и турбулентный. Число Рейнольдса и его критические значения для течения в трубах и каналах. Понятие турбулентности. Представления о гидродинамическом пограничном слое при течении по трубам и каналам. Эпюры скоростей при ламинарном и турбулентном течении жидкости в трубе. Гидродинамическое сопротивление при течении жидкостей и газов. Расчет потерь на трение (уравнение Дарси-Вейсбаха) и на местные сопротивления. Расчет диаметра трубопроводов и аппаратов; выбор скоростей потоков и оптимального диаметра трубопроводов.
3. Понятие напора насоса и его энергетический смысл. Расчет напора для перемещения жидкостей через систему трубопроводов и аппаратов. Основные параметры работы насосов: производительность, напор, мощность, КПД. Определение допустимой высоты всасывания. Явление кавитации и его предотвращение. Характеристики центробежных и плунжерных насосов. Работа центробежных насосов на гидравлическую сеть. Классификация насосов. Объемные и динамические насосы. Основные конструкции насосов.
4. Неподвижные зернистые слои и псевдооживленные слои. Характеристики зернистых слоёв: диаметр частиц и диаметр каналов, порозность и удельная поверхность. Основные зависимости. Число Рейнольдса и его критические значения для течения в зернистых слоях. Гидравлическое сопротивление неподвижных и псевдооживленных зернистых слоёв.
5. Разделение гетерогенных систем фильтрованием и осаждением. Материальные баланс разделения суспензий фильтрованием и осаждением. Кинетика процесса фильтрования, основное уравнение фильтрования. Расчёт поверхности фильтра. Кинетика процесса свободного и стеснённого осаждения. Режимы движения при обтекании жидкостью твёрдой частицы. Расчёт поверхности осадительного аппарата. Конструкции фильтров и осадительных аппаратов.
6. Общие вопросы теплопередачи. Уравнение теплового баланса без изменения и при изменении агрегатного состояния. Закон Фурье. Уравнение Фурье-Кирхгофа. Элементы теории подобия в теплообмене. Теплопроводность через плоские и цилиндрические стенки. Коэффициенты теплопроводности газов, жидкостей, твердых тел. Расчет толщины тепловой изоляции. Промышленные теплоносители: дымовые газы, водяной пар, пары высокотемпературных органических теплоносителей, вода, минеральные масла,

высокотемпературные органические теплоносители. Теплоносители для охлаждения (хладагенты): воздух, вода, холодильные рассолы, аммиак, фреоны (хладоны).

7. Теплопередача в поверхностных теплообменниках. Аддитивность термических сопротивлений. Расчет коэффициентов теплоотдачи в процессах теплообмена без изменения и с изменением агрегатного состояния. Расчет средней движущей силы процесса теплопередачи. Влияние взаимного направления движения теплоносителей на движущую силу теплопередачи. Теплообменные аппараты химических производств. Кожухотрубчатые теплообменники. Пластинчатые теплообменники. Двухтрубные теплообменники. Оросительные теплообменники. Погружные теплообменники. Оребренные теплообменники. Спиральные теплообменники. Аппараты с двойными стенками (рубашками). Блочные теплообменники. Градирни. Регенеративные теплообменники.

8. Процесс выпаривания растворов и области его применения. Материальный баланс процесса выпаривания. Расчет температуры кипения растворов нелетучих веществ: правило Бабо и уравнение Тищенко. Концентрационная, гидростатическая и гидравлическая депрессии. Движущая сила в выпарном аппарате.

9. Однокорпусные и многокорпусные выпарные аппараты. Тепловой баланс процесса выпаривания. Теплопередача в выпарном аппарате. Расчет и подбор выпарного аппарата. Основные конструкции выпарных аппаратов.

10. Массопередача с твердой фазой. Диффузионный критерий Био. Фазовое равновесие в процессах адсорбции. Кинетика и динамика процесса адсорбции. Конструкции промышленных адсорберов.

11. Сушка твердых материалов. Классификация процессов сушки. Материальный и тепловой баланс конвективной сушки. Внутренний баланс сушильной камеры. Свойства влажного воздуха и диаграмма состояния влажного воздуха (диаграмма Рамзина). Варианты проведения процесса конвективной сушки. Конструкции сушильных аппаратов.

12. Кинетика конвективной сушки. Равновесие фаз при сушке. Формы связи влаги с материалом. Кривая скорости сушки. Первый и второй периоды сушки.

13. Классификация и основные понятия процессов массообмена. Способы выражения состава фаз. Понятие о массопередаче и массоотдаче. Материальный баланс непрерывного массообменного процесса. Основное уравнение массопередачи. Механизмы переноса массы. Диффузионный пограничный слой; профили концентраций и скоростей в потоках. Аддитивность диффузионных сопротивлений. Дифференциальное уравнение конвективного переноса массы. Расчет движущей силы массопередачи. Понятие числа единиц переноса. Понятие теоретической ступени разделения. Методы расчета массообменных аппаратов с непрерывным и ступенчатым контактом фаз.

14. Абсорбция. Основные понятия. Физическая абсорбция и хемосорбция. Равновесная и рабочая линии при абсорбции. Минимальный и оптимальный расход поглотителя. Степень извлечения. Десорбция и методы регенерации абсорбентов.

15. Расчет диаметра и высоты абсорбционной колонны. Гидравлические режимы работы насадочных и тарельчатых абсорберов. Основные типы и конструкции абсорберов.

16. Перегонка и ректификация. Равновесие в системе пар-жидкость. Материальный баланс процессов перегонки и ректификации. Расчёт бинарной ректификации, основные допущения, уравнения рабочих линий. Минимальное и действительное флегмовое число. Определение оптимального флегмового числа.

17. Расчет диаметра и высоты ректификационной колонны. Тепловой баланс ректификационной установки. Схемы установок для непрерывной, периодической экстрактивной и азеотропной ректификации.

18. Жидкостная экстракция. Равновесие в системе жидкость-жидкость. Треугольные диаграммы. Материальный баланс жидкостной экстракции. Кинетика жидкостной экстракции. Основные способы проведения экстракции. Конструкции промышленных экстракторов.

7. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы.

Студентам предоставляются программа курса и план занятий. По теме каждой лекции указывается материал в источниках из списков основной и вспомогательной литературы, а также из интернет-ресурсов. Студентам предоставляются также примеры домашних заданий, контрольных работ и список вопросов к экзамену.

8. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Со всех компьютеров МГУ организован доступ к полным текстам научных журналов и книг на русском и иностранных языках. Доступ открыт по IP-адресам, логин и пароль не требуются: <http://nbgmu.ru/>

Основная литература:

1. Разинов А.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие /А.И.Разинов, А.В.Клинов, Г.С.Дьяконов; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. – 860 с.

2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 2011. – 1230 с.

3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учебн. пособие для вузов. - СПб.: Химиздат, 2009. - 544 с.

4. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин - 14-е изд., стереотип. - М.: Альянс, 2008. - 750 с.

5. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник для вузов: в 2-х книгах. под ред. В.Г.Айнштейна. - М.: Логос: Высшая школа. -2003.

Дополнительная литература:

1. Насосы химических производств: учебно-методическое пособие / сост.: Е. А. Дмитриев, Е. П. Моргунова, Р. Б. Комляшев. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. - 48 с.

2. Теплообменные аппараты химических производств: учеб. пособие/ Е. А. Дмитриев, Е. П. Моргунова, Р. Б. Комляшев. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013. – 88 с.
3. Аппаратура процессов разделения гомогенных и гетерогенных систем: учеб. пособие/ Е. А. Дмитриев, Р. Б. Комляшев, Е. П. Моргунова, А. М. Трушин, А. В. Вешняков, Л. С. Сальникова. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2016. – 104 с.

Интернет-ресурсы

1. ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>
2. ИБЦ РХТУ им. Д.И. Менделеева <http://lib.muctr.ru/>
3. Электронная библиотека диссертаций (ЭБД) <http://diss.rsl.ru/>
4. ЭБС «Научно-электронная библиотека eLibrary.ru» <http://elibrary.ru>

- Описание материально-технической базы.

Занятия проводятся в специально оборудованных аудиториях (ауд. 208, ауд. 308 корпуса ХТ). Аудитории снабжены средствами мультимедиа презентаций и доступом в сеть Интернет.

9. Язык преподавания - русский

10. Преподаватель (преподаватели): Комляшев Роман Борисович, доцент, кандидат технических наук, komlyashev@muctr.ru, тел. (495)4265557.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы оценочных средств для текущего контроля усвоения материала и промежуточной аттестации - экзамена. На экзамене про

Примеры домашних заданий

(для решения некоторых задач студент самостоятельно должен найти недостающую информацию в основной или дополнительной литературе):

Домашняя работа 1

По трубе диаметром 14×3 мм движется жидкий анилин в количестве 0,4 т/ч, его температура составляет 60 °С. Далее жидкость поступает в испаритель, после которого паровой поток движется с тем же массовым расходом по трубе большего диаметра при нормальном атмосферном давлении и температуре, соответствующей температуре кипения жидкости.

Определите:

- 1) скорость потока жидкости в трубопроводе;
- 2) подберите диаметр трубопровода для парового потока;
- 3) подберите диаметр трубопровода, для потока жидкости, если её массовый расход возрастёт втрое.

Домашняя работа 2

По трубопроводу длиной 35 м и диаметром 14×3 мм из монтежу в закрытую ёмкость при температуре 50 °С перекачивается жидкость (анилин). Расход жидкости составляет 0,5 т/ч. Трубопровод гидравлически гладкий. Высота поёма жидкости 10 м.

На трубопроводе установлены:

диафрагма с диаметром отверстия 4,23 мм,

повороты (отводы) под прямым углом с относительным радиусом закругления 1 в количестве 6 шт.,
нормальный вентиль.

Определите:

- 1) коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);
- 2) сумму коэффициентов местных сопротивлений;
- 3) гидравлическое сопротивление трубопровода (Па);
- 4) избыточное давление в монтежу, если давление в верхней ёмкости 1,9 ата, а атмосферное давление 746 мм. рт. ст.

Домашняя работа 3

Центробежный насос подаёт органическую жидкость (анилин) из открытой ёмкости в напорный бак, находящийся выше на 10 м. Расход жидкости составляет 6 т/ч. Напорный бак находится под абсолютным давлением 2,1 кгс/см². Атмосферное давление составляет 741 мм. рт. ст., температура 40 °С. Транспортировка жидкости осуществляется по трубопроводу диаметром 38×2 мм и длиной 22 м (диаметры всасывающего и нагнетательного трубопроводов равны). Коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси) принять равным 0,038. Сумма местных сопротивлений 26,5.

Определите:

- 1) потери напора в трубопроводе и напор насоса;
- 2) марку насоса, при заданной производительности обеспечивающего напор, достаточный для работы на данную сеть, и при этом имеющего наименьшую мощность из всех насосов, подходящих для данной сети;
- 3) мощность насоса по мощности гидравлической сети, сравнив её с табличным значением.

Домашняя работа 4

В вертикальный цилиндрический аппарат диаметром 1,34 м на сетку засыпан зернистый слой адсорбента высотой 0,4 м. Средний диаметр частиц слоя 2,05 мм, плотность этих частиц 800 кг/м³, фактор формы для них может быть принят равным 0,8, а порозность слоя в неподвижном состоянии составляет 0,4. Через слой необходимо пропускать 2,48 м³/с воздуха (с целью его осушки) с температурой 20°С при нормальном атмосферном давлении. Изменением плотности воздуха при прохождении его через слой можно пренебречь. В каком состоянии будет находиться слой и каково его гидравлическое сопротивление для двух случаев: 1) воздух проходит через слой снизу вверх, 2) сверху вниз.

Домашняя работа 5

В водном растворе содержатся твёрдые частицы, форма которых может быть представлена как цилиндр диаметром 300 мкм и высотой 30 мкм. Образованная частицами суспензия, содержащая 12% (об.) твёрдой фазы, при 20°С делится на открытом нутч-филт্রে на осадок с влажностью 50% (об.) и фильтрат, практически свободный от твёрдой фазы. Определить время фильтрования 20 м³ такой суспензии на фильтре площадью 1 м², если перепад давления составляет 400 мм рт. ст. Фильтрующая перегородка имеет толщину 2 мм, диаметр пор 20 мкм. На один квадратный миллиметр поверхности перегородки приходится 1000 пор.

Домашняя работа 6

Цилиндрический непрерывнодействующий гребковый отстойник с поверхностью осаждения 10 м² используют для разделения при 30 °С 10 т/ч водной суспензии, содержащей 10 % масс. кварца. Осветленная вода содержит 0,1 % масс. кварца, а осадок имеет влажность 40 % масс. Каков минимальный размер частиц кварца, оседающих в отстойнике? В расчёте учесть стес-

нённый характер осаждения, а отклонением формы частиц от сферической пренебречь. Принять, что осаждение происходит в ламинарной области, проверив справедливость этого допущения в ходе расчёта. Изобразить схему устройства аппарата.

Домашняя работа 7

В одноходовом кожухотрубчатом теплообменнике производится охлаждение 45 т/ч органической жидкости (анилин) от начальной температурой 163 °С до конечной температуры 53 °С. Охлаждение производится водой, поступающей в трубное пространство теплообменника с начальной температурой 20 °С и покидающей теплообменник с конечной температурой 32 °С. Потери тепла в окружающую среду составляют 9 % от тепловой нагрузки теплообменного аппарата.

Определите:

- 1) тепловую нагрузку теплообменника;
- 2) среднюю движущую силу теплопередачи;
- 3) ориентировочную поверхность теплопередачи.

Домашняя работа 8

Выполните поверочный расчёт вертикального кожухотрубчатого подогревателя, в котором производится нагрев 137 т/ч органической жидкости (бензол) от 22 °С до 56 °С. В качестве теплоагента используется насыщенный водяной пар, подающийся в межтрубное пространство теплообменника под избыточным давлением 5 кгс/см². Атмосферное давление 765 мм рт. ст. Тепловыми потерями пренебречь. При расчёте учесть загрязнения стенок труб теплообменника.

Характеристики теплообменника:

Площадь поверхности $A_{ТО}=40 \text{ м}^2$,

диаметр кожуха $D=600 \text{ мм}$,

диаметр труб $\varnothing=25 \times 2 \text{ мм}$,

число ходов $k=1$,

число труб $N=257$,

длина труб $L=2 \text{ м}$.

Домашняя работа 9

В пластинчатом теплообменнике производится охлаждение 71 т/ч органической жидкости (бензол) от 75 °С до 35 °С. В качестве хладагента используется вода, нагревающаяся от 21 °С до 30 °С. Тепловыми потерями пренебречь. Пластинчатый теплообменник собран из 136 пластин площадью 0,6 м² каждая. Теплоагент движется по двухпакетной схеме, хладагент - по однопакетной схеме. Выполнить поверочный расчёт теплообменника и определить коэффициент запаса теплообменника по поверхности теплопередачи.

Домашняя работа 10

Водный раствор, содержащий 6 % масс. сульфата натрия при температуре 20 °С подаётся с расходом 6,3 т/ч в выпарной аппарат с выносной греющей камерой, где при давлении в сепараторе 60 кПа упаривается до содержания 30 % масс. Для подвода теплоты используется первичный насыщенный водяной пар давлением 5 бар. Вторичный пар конденсируется (без охлаждения конденсата) в теплообменном аппарате поверхностного типа. Теплота конденсации вторичного пара отводится оборотной водой.

Определите: 1) расходы первичного пара и водооборотной воды; 2) среднюю температуру кипения раствора в трубах греющей камеры; 3) площадь поверхности теплопередачи выпарного аппарата.

Домашняя работа 11

В конвективной сушилке, работающей по нормальному сушильному варианту, подвергают сушке 3,6 т/ч влажного мела. Влажность материала меняется от 20 до 2% (масс.). Температура материала до сушки 20°С, после 45°С. Теплоёмкость высушенного материала принять равной теплоёмкости сухого мела. Воздух, входящий в калорифер, имеет температуру 20°С и относительную влажность 80%; воздух, выходящий из сушильной камеры, температуру 50°С и относительную влажность 80%. Масса транспортирующего устройства 600 кг, время его пребывания в сушильной камере 1 ч, теплоёмкость материала, из которого оно изготовлено, 0,5 кДж/(кг·К). Потери тепла в сушильной установке составляют 12% от тепловой нагрузки калорифера. Определить: 1) расход сухого воздуха (кг/с) и производительность нагнетательной воздуходувки (м³/с); 2) тепловую нагрузку калорифера (кВт) и внутренний баланс сушильной камеры (кДж/кг). Изобразить процесс сушки на диаграмме Рамзина.

Домашняя работа 12

В насадочной абсорбционной колонне при температуре 15 °С и давлении 0,4 МПа производится очистка 20000 м³/ч (расход приведён к н.у.) природного газа от содержащегося в нём диоксида углерода. Орошение колонны производится водным раствором диэтанолamina.

Содержание диоксида углерода в природном газе 3 % об., степень поглощения 92 %. Коэффициент избытка поглотителя 1,28. Содержание диоксида углерода в абсорбенте, поступающем на орошение колонны, составляет 2 г/л. Равновесие в абсорбере описывается уравнением $Y^*=0,0278 \cdot X$.

Насадка абсорбционной колонны неупорядоченная, состоящая из керамических колец Рашига размером 50×50×5 мм. Коэффициент смачиваемости насадки 84 %.

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе 3 кмоль/(м²·ч), в газовой фазе 5 кмоль/(м²·ч).

Определите диаметр и высоту абсорбционной колонны.

Молярная масса инерта (природного газа) 18 кг/кмоль.

Молярная масса поглотителя (водного раствора диэтанолamina) 19,6 кг/кмоль.

Плотность поглотителя 1015 кг/м³.

Вязкость поглотителя 1,27 мПа·с.

Домашняя работа 13

В насадочной ректификационной колонне при разделении бинарной смеси этанол - вода, содержание низкокипящего компонента в которой 30 % масс., получают 2,963 т/ч дистиллята, содержащего 85 % масс. низкокипящего компонента, и кубовую жидкость, содержащую 3 % масс. низкокипящего компонента.

Определите:

- 1) массовый расход исходной смеси и кубовой жидкости;
- 2) минимальное флегмовое число и флегмовое число, если коэффициент избытка флегмы 1,99;
- 3) уравнения рабочих линий;
- 4) тепловую нагрузку дефлегматора и расход охлаждающей воды, если она нагревается от 17 °С до 23 °С;
- 5) тепловую нагрузку кипятильника и расход греющего пара, если его давление 4 кгс/см²;
- 6) диаметр ректификационной колонны, если колонна заполнена внавал кольцами Рашига размером 35×35×4 мм;
- 7) число единиц переноса для верхней и нижней частей колонны;
- 8) высоту колонны, если высота единицы переноса для верхней части колонны 1,54, высота единицы переноса для нижней части колонны 1,98.

Данные о парожидкостном равновесии возьмите из справочника Коган В. Б., Фридман В. М., Кафаров В. В. Равновесие между жидкостью и паром.

Контрольная работа 1

Центробежный насос подаёт воду из открытого бака по новому стальному трубопроводу с производительностью 30 м³/ч и напором 60 м вод. ст. Температура воды 50°С. Атмосферное давление 745 мм рт. ст. Диаметр всасывающей линии 108×4 мм, её длина 10 м. Местными сопротивлениями на всасывающей линии можно пренебречь.

ОПРЕДЕЛИТЬ:

- 1) Предельную высоту всасывания воды при кавитационной поправке 2,2 м вод. ст.
- 2) Мощность на валу насоса, если его полный КПД составляет 0,7.
- 3) Как изменится мощность насоса, если частота вращения увеличится в полтора раза.

Контрольная работа 2

Цилиндрический непрерывнодействующий гребковый отстойник с поверхностью осаждения 10 м^2 используют для разделения при 30°C 10 т/ч водной суспензии, содержащей 10% масс. кварца. Осветленная вода содержит $0,1 \%$ масс. кварца, а осадок имеет влажность 40% масс. Каков минимальный размер частиц кварца, оседающих в отстойнике? В расчёте учесть стеснённый характер осаждения, а отклонением формы частиц от сферической пренебречь. Принять, что осаждение происходит в ламинарной области, проверив справедливость этого допущения в ходе расчёта. Изобразить схему устройства аппарата.

Контрольная 3

Насыщенный пар толуола в количестве 1200 кг/ч конденсируется при давлении 760 мм. рт. ст. в кожухотрубчатом вертикальном конденсаторе. Жидкий толуол не переохлаждается. Тепло конденсации отводится водой, нагреваемой от 20 до 40°C . Вода движется в стальных трубах (марка стали Ст.3) диаметром $25 \times 2 \text{ мм}$ со скоростью $0,35 \text{ м/с}$. Коэффициент теплопередачи от пара к воде $K = 840 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Потерей тепла в окружающую среду и термическими сопротивлениями загрязнений пренебречь.

Определите:

- 1) движущую силу процесса теплопередачи;
- 2) площадь поверхности теплопередачи в аппарате;
- 3) расход охлаждающей воды;
- 4) коэффициент теплоотдачи к воде,
- 5) коэффициент теплоотдачи от пара, воспользовавшись известным коэффициентом теплопередачи.

Контрольная 4

В последнем корпусе выпарной установки водный раствор сульфата натрия упаривается от 13% масс. до 25% масс. Аппарат имеет поверхность теплопередачи 100 м^2 , высоту кипяtilьных труб $1,8 \text{ м}$, коэффициент теплопередачи $800 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C)}$. Обогрев осуществляется вторичным паром с давлением 1 ата . Полезная разность температур в аппарате $11,1^\circ\text{C}$. Теплоёмкости 13 и 25% -го растворов соответственно равны $3,8$ и $3,0 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Плотность раствора в корпусе 1230 кг/м^3 . В предпоследнем корпусе раствор кипит при 107°C . Определить: 1) производительность по исходному раствору; 2) расход греющего пара; 3) вакуум в барометрическом конденсаторе, приняв гидравлическую депрессию равной 1°C , а атмосферное давление 740 мм рт. ст. ; 4) изобразить схему аппарата (с вынужденной циркуляцией).

Контрольная 5

В конвективной сушилке, работающей по нормальному сушильному варианту, подвергают сушке $3,6 \text{ т/ч}$ влажного мела. Влажность материала меняется от 20 до 2% масс. Температура материала до сушки 20°C , после 45°C . Теплоёмкость высушенного материала принять равной теплоёмкости сухого мела. Воздух, входящий в калорифер, имеет температуру 20°C и

относительную влажность 70 %; воздух, выходящий из сушильной камеры, температуру 50 °С и относительную влажность 80%. Масса транспортирующего устройства 600 кг, время его пребывания в сушильной камере 1 ч, теплоёмкость материала, из которого оно изготовлено, 0,5 кДж/(кг·К). Потери тепла в сушильной установке составляют 12 % от тепловой нагрузки калорифера. Определить: 1) расход сухого воздуха (кг/с) и производительность нагнетательной воздуходувки (м³/с); 2) тепловую нагрузку калорифера (кВт) и внутренний баланс сушильной камеры (кДж/кг). Изобразить процесс сушки на диаграмме Рамзина.

Контрольная 6

В насадочном абсорбере производится очистка воздуха от паров бензола чистым соляровым маслом при следующих условиях:

- 1) производительность абсорбера 1000 м³/ч (при рабочих условиях) загрязнённого воздуха;
- 2) давление в абсорбере 760 мм рт. ст, температура 30 °С;
- 3) содержание бензола в исходной смеси 5 % об.;
- 4) улавливается 80 % поступающего в абсорбер бензола;
- 5) концентрация бензола в вытекающем из абсорбера масле 17 % масс.;
- 6) диаметр абсорбера 1 м;
- 7) насадка неупорядоченная из керамических колец Рашига 25×25×3 мм;
- 8) коэффициент смачивания насадки 0,9;
- 9) коэффициент массопередачи 1,7 кг/(м²·ч);
- 10) уравнение равновесной линии $Y^* = 0,5 \cdot X$ (относительные массовые доли).

ОПРЕДЕЛИТЬ:

- 1) расход инерта (чистого воздуха);
- 2) расход поглотителя (чистого солярового масла);
- 3) движущую силу процесса массопередачи по газовой фазе;
- 4) необходимую высоту насадки;
- 5) высоту колонны, если высота одного сегмента насадки 3 м.

Контрольная 7

В насадочной ректификационной колонне разделяется смесь метанол-вода. Нагрузка по исходной смеси 4 т/ч, содержание метанола в исходной смеси 20 % масс., в ректификате 96 % масс., в кубовом остатке 0,5 % масс. Рабочее флегмовое число равно 3. Давление нормальное атмосферное. В кипятильник подаётся греющий пар с давлением 3 ата. Потери тепла принять 5 % от тепловой нагрузки кипятильника. При тепловом расчёте кубовый остаток можно считать чистой водой, а пары, выходя-

щие из колонны – чистым метанолом. Температура исходной смеси на входе в колонну 85 °С. Определить: 1) количество ректификата и кубового остатка; 2) количество флегмы, поступающей в колонну; 3) расход греющего пара в кипятильник; 4) составить схему установки.

Перечень вопросов к экзамену:

1. Вывод уравнения неразрывности. Какой вид имеет это уравнение при стационарном течении несжимаемой среды и при неустановившемся течении.
2. Вывод уравнения Навье – Стокса для одномерного движения. Каков физический смысл слагаемых?
3. Проведите подобное преобразование уравнений Навье-Стокса для неустановившегося течения с получением обобщенных переменных (критериев гидродинамического подобия). Каков общий вид критериального уравнения применительно к задаче определения потерь напора (давления)? Физический смысл критериев подобия.
4. Преобразование уравнений Навье – Стокса для покоящейся жидкости. Как получить уравнения Эйлера, основное уравнение гидростатики.
5. Вывод дифференциальных уравнений Эйлера для течения идеальной жидкости. Чем отличается идеальная жидкость от реальной?
6. Вывод дифференциальных уравнений Эйлера для равновесия жидкости.
7. Выведите основное уравнение гидростатики. Назовите практические приложения этого уравнения. Закон Паскаля.
8. Вывод уравнения для распределения скорости по радиусу трубы при стационарном ламинарном течении.
9. Вывод уравнения постоянства расхода для канала (трубопровода) с переменным поперечным сечением.
10. Вывод уравнения для расчета коэффициента гидравлического трения при ламинарном движении жидкости в трубе круглого поперечного сечения.
11. Вывод уравнения Бернулли для идеальной жидкости. Каков физический смысл слагаемых этого уравнения? Приведите примеры практического использования этого уравнения (измерение расхода).
12. Вывод уравнения Бернулли для идеальной жидкости. Опишите особенности движения реальной жидкости. Приведите вид уравнения Бернулли для реальной жидкости. Каков его энергетический смысл?
13. Напор насоса, его энергетический смысл. Вывод формулы для расчета напора проектируемого к установке насоса. Вывод формулы для расчёта напора действующего насоса (через показания манометра и вакуумметра).
14. Вывод формулы для расчета высоты всасывания насоса. От каких факторов зависит допустимая высота всасывания насосов? Ответ обоснуйте анализом формулы для расчета высоты всасывания.
15. Потенциал переноса энергии и массы. Вывод уравнение переноса.
16. Вывод дифференциального уравнения конвективного теплообмена Фурье-Кирхгофа. Вид уравнения для стационарного и нестационарного теплообмена.

17. Перенос тепла конвекцией. Уравнение теплоотдачи. Подобное преобразование дифференциального уравнения конвективного теплообмена Фурье-Кирхгофа. Критерии Фурье, Нуссельта, Пекле, Прандтля.
18. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности для установившегося и неустановившегося процесса (из уравнения Фурье-Кирхгофа). Каковы размерность и физический смысл коэффициента теплопроводности?
19. Вывод уравнения аддитивности термических сопротивлений при теплопередаче с постоянными температурами теплоносителей для плоской стенки.
20. Связь коэффициента теплопередачи и коэффициентов теплоотдачи при теплопередаче с постоянными температурами теплоносителей для плоской стенки. Какова размерность и каков физический смысл этих коэффициентов?
21. Вывод уравнений теплопроводности через однослойные и многослойные плоские стенки для стационарного процесса. Изобразите графически профили изменения температуры по толщине таких стенок, различающихся коэффициентами теплопроводности.
22. Вывод уравнений теплопроводности через цилиндрические стенки для стационарного процесса. При каких условиях можно практически пренебречь кривизной цилиндрической стенки, сведя задачу к теплопроводности через плоскую стенку?
23. Вывод уравнения для расчета движущей силы теплопередачи при переменных температурах теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.
24. Составить уравнения материального баланса при разделении суспензий и вывести из них выражения для расчета массового расхода осветленной жидкости и осадка.
25. Вывод формулы для расчета производительности отстойников для запыленных газов и суспензий.
26. Осаждение под действием силы тяжести. Силы, действующие на частицу. Вывести уравнения для определения скорости свободного осаждения шара.
27. Расчет скорости осаждения частиц сферической формы под действием силы тяжести.
28. Вывод формулы для расчета потребной поверхности осаждения частиц в отстойниках для запыленных газов и суспензий.
29. Критерий Архимеда при осаждении, его физический смысл, использование в расчетах скорости осаждения.
30. Кинетика осаждения. Гидродинамические режимы обтекания тел. Привести график зависимости коэффициента сопротивления среды от критерия Рейнольдса.
31. Привести уравнение фильтрования при постоянном перепаде давления к виду, удобному для экспериментального определения сопротивления осадка и фильтровальной перегородки.
32. Основные параметры, характеризующие зернистый слой. Получить выражения эквивалентного диаметра через удельную поверхность и диаметр частиц.
33. Действительная и фиктивная (приведенная) скорости потока в зернистом слое. Каково соотношение между ними?
34. Охарактеризовать состояние зернистого слоя в зависимости от скорости восходящего потока газа или жидкости. Сопроводите ответ графическими изображениями зависимостей потери давления и высоты слоя от скорости потока.

35. Охарактеризовать состояние зернистого слоя в зависимости от скорости восходящего потока газа или жидкости. Как рассчитать потерю давления в псевдооживленном слое?
36. Назвать и сопоставить основные способы разделения суспензий. Указать их преимущественные области применения.
37. Охарактеризовать основные способы очистки газов от пыли. Указать их преимущественные области применения.
38. Вывести дифференциальное уравнение конвективной диффузии. Рассмотреть частный случай диффузии в неподвижной среде.
39. Первый закон Фика. Вывести дифференциальное уравнение конвективной диффузии.
40. Получить диффузионные критерии подобия. Определяемый и определяющие критерии. Физический смысл массообменных критериев подобия.
41. Получить уравнение аддитивности диффузионных сопротивлений. Сформулировать допущения при выводе.
42. Вывести соотношение между коэффициентами массопередачи и массоотдачи. Из каких уравнений получают коэффициенты массоотдачи?
43. Материальный баланс и уравнение рабочей линии при абсорбции. Вывести это уравнение при противотоке газа и жидкости. Как определяется минимальный удельный расход абсорбента?
44. Вывести уравнение рабочей линии для массообменных аппаратов (на примере абсорберов) при противоточном движении фаз идеальным вытеснением в условиях неизменности их расхода.
45. Вывести уравнения для расчета средней движущей силы массопередачи.
46. Расчет высоты и диаметра противоточных колонных аппаратов с непрерывным контактом фаз.
47. Расчет высоты и диаметра противоточных колонных аппаратов со ступенчатым контактом фаз.
48. Методы расчета высоты противоточных колонных аппаратов с непрерывным контактом фаз. Понятие теоретической ступени разделения и числа единиц переноса.
49. Методы расчета высоты противоточных колонных аппаратов со ступенчатым контактом фаз. Понятие теоретической ступени разделения. КПД по Мэрфри.
50. Получить систему уравнений, описывающих процесс простой перегонки.
51. Материальный баланс процесса простой перегонки. Расчет количества кубового остатка, количества и среднего состава дистиллата.
52. Вывести уравнения рабочих линий ректификационной колонны непрерывного действия.
53. Вывести уравнение рабочей линии для укрепляющей части ректификационной колонны. Описать, как строят рабочие линии на диаграмме $y-x$, сформулировав необходимые допущения.
54. Вывести уравнения рабочих линий для ректификационной колонны непрерывного действия при постоянстве мольных расходов фаз (с необходимыми пояснениями, указав обозначения и допущения). Как зависит положение этих линий на диаграмме $y-x$ от флегмового числа?

55. Эффективность ступени по Мэрфри. Вывести (на примере абсорбции) зависимость между эффективностью по Мэрфри и числом единиц переноса при идеальном смешении жидкости и идеальном вытеснении газа.
56. Вывести формулу для расчёта минимального флегмового числа при непрерывной ректификации. Какие принципы используют для оптимизации при определении флегмового числа?
57. Зависимость между флегмовым числом, размерами колонны и расходом теплоты при ректификации. Каковы принципы выбора оптимального флегмового числа? (Выражение для минимального флегмового числа – вывести).
58. Вывести уравнение теплового баланса ректификационной колонны непрерывного действия. Как определяется расход греющего пара в кипятильнике?
59. Вывести уравнение теплового баланса ректификационной колонны непрерывного действия. Как определяется расход теплоносителя в дефлегматоре?
60. Какие основные цели достигаются при выпаривании? Составьте уравнения материальных и теплового балансов для выпарного аппарата и приведите последнее к виду, удобному для инженерного расчёта. Приведите выражение для расчёта площади поверхности теплообмена в аппарате.
61. С какой целью применяют многокорпусное выпаривание? Составьте уравнения материальных и теплового балансов для II корпуса установки, работающей без отбора экстра-пара, и приведите последнее к виду, удобному для инженерного расчёта. Приведите выражение для расчёта площади поверхности теплообмена в аппарате.
62. С какой целью применяют многокорпусное выпаривание? Составьте уравнения материальных и теплового балансов для II корпуса двухкорпусной установки, работающей с отбором экстра-пара, и приведите последнее к виду, удобному для инженерного расчёта. Приведите выражение для расчёта площади поверхности теплообмена в аппарате.
63. Что называют общей, а что — полезной разностью температур в многокорпусных выпарных установках? Выведите формулу для распределения суммарной полезной разности температур по корпусам при условии равенства площадей поверхности теплообмена всех аппаратов. Как на практике реализуется заданное распределение полезной разности температур?
64. Получите математическое описание модели идеального смешения для аппарата непрерывного действия при импульсном вводе индикатора и изобразите соответствующую кривую отклика.
65. Получите математическое описание модели идеального смешения для аппарата непрерывного действия при ступенчатом вводе индикатора и изобразите соответствующую кривую отклика.
66. Каковы особенности массопередачи в системах с твёрдой фазой? Подобным преобразованием соответствующих дифференциальных уравнений получите критерии подобия. Каков физический смысл каждого из них? Как воздействовать на лимитирующую стадию массопереноса в системе «газ (жидкость) – твёрдое тело»?
67. Составьте материальные и тепловые балансы конвективной сушилки, работающей по основному варианту, приведя обозначения соответствующих величин. Обоснуйте ход построения на диаграмме «N – Y» линии изменения параметров воздуха (газа) в сушильной камере.

68. Составьте материальные и тепловые балансы камеры конвективной сушилки, работающей по варианту с дополнительным подводом теплоты, приведя обозначения соответствующих величин. Обоснуйте ход построения на диаграмме «Н – У» линии изменения параметров воздуха (газа) в сушильной камере.

69. Получите выражение для внутреннего теплового баланса сушильной камеры. Дайте определение «теоретической сушилки». Как изображается линия изменения параметров воздуха (газа) в сушильной камере на «Н –У» диаграмме для теоретической сушилки?

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Шкала оценивания знаний, умений и навыков является единой для всех дисциплин (приведена в таблице ниже)

ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)				
Оценка Результат	2	3	4	5
Знания	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности не принципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения)	Отсутствие навыков	Наличие отдельных навыков	В целом, сформированные навыки, но не в активной форме	Сформированные навыки, применяемые при решении задач

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)	ФОРМА ОЦЕНИВАНИЯ
Знать: принципы физического моделирования процессов; Знать: основные уравнения движения жидкостей; Знать: типовые процессы химической технологии, соответствующие аппараты и методы их расчета. Знать: сущность основных понятий, терминов, определений, законов, способов расчёта основных процессов и аппаратов химической технологии; Знать: основы теории переноса импульса, тепла и массы;	мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на экзамене

<p>Знать: основы теории теплопередачи; Знать: основы теории массопередачи в системах со свободной и неподвижной границей раздела фаз.</p>	
<p>Уметь: определять характер движения жидкостей и газов; Уметь: определять основные характеристики процессов тепло- и массопередачи; Уметь: рассчитывать параметры и выбирать аппаратуру для конкретного технологического процесса; Уметь: рассчитывать основные характеристики химико- технологического процесса, выбирать рациональную схему.</p>	<p>мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на экзамене</p>
<p>Владеть: методами технологических расчетов отдельных узлов и деталей химического оборудования; Владеть: навыками проектирования типовых аппаратов химической промышленности; Владеть: методами определения рациональных технологических режимов работы оборудования.</p>	<p>мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на экзамене</p>