

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Химический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Декан
химического факультета
Ю.Г. Слизов
«30» июня 2014 года

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
Методические указания к семинарским и практическим занятиям
для студентов четвертого курса
химического факультета

Томск 2014

РАССМОТРЕНО И ОДОБРЕНО методической комиссией
химического факультета

протокол от « 13 » мая 2014 г. № 17

Председатель комиссии, доцент В.В. Хасанов

В методических указаниях приводится полная программа по курсу «Химическая технология», планы лекционных, семинарских и лабораторных занятий, список основной и дополнительной литературы, вопросы и упражнения к семинарским занятиям.

Методические указания по общей химической технологии предназначен для студентов химического факультета ТГУ.

Одобрено кафедрой неорганической химии,
Зав. кафедрой, д.т.н., профессор В.В. Козик

Составитель: доцент, канд. хим. наук Л.А. Егорова

Рецензент: профессор, д-р техн. наук В.В. Козик

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Химическая технология» раскрывает взаимосвязь между развитием химической науки и химической технологии и направлен на формирование у студентов основы технологического мышления. Он предполагает подготовку выпускников к активной творческой деятельности по разработке перспективных химико-технологических процессов, созданию современных функциональных материалов и совершенных технологических схем.

Технологии нового поколения – это наукоемкие технологии. В соответствии с мировыми тенденциями и возрождением отечественной индустрии на новом технологическом уровне, курс химической технологии должен обеспечить понимание студентами многоуровневого и многокритериального характера задач создания новых технологий. Курс предоставляет знания и навыки, необходимые для грамотного поиска точек приложения новых научных результатов, экспертизы технологических решений на основе универсальных критериев, вытекающих из фундаментальных законов природы.

Значительное место в курсе отведено методологическим вопросам науки о химико-технологических процессах, обоснованию и применению критериев термодинамического совершенства химико-технологических процессов, физико-химическим принципам классических технологических операций и их базовым математическим моделям, методологии анализа и синтеза технологических систем сложной иерархической структуры (системный анализ).

Особенностью курса химической технологии является активное использование и углубление тех знаний, которые студенты приобретают при изучении предшествующих курсов, включая многие разделы математики, физики, химической термодинамики, химической кинетики и катализа, химии неорганических и органических веществ.

При изучении курса студенты приобретают профессиональные знания, умения, навыки:

- знание основных методов и приемов систематического использования закономерностей химических, физических и технических наук для решения типовых задач технологии применительно к массовому, промышленному производству;

- знание термодинамических и кинетических закономерностей и их приложение к химико-технологическим процессам;

- знание макрокинетических факторов (гидродинамики, тепло- и массообмена) и умение анализировать их влияние на химико-технологический процесс;
- умение использовать технологические приемы ускорения и замедления реакций;
- знание перспектив применения в производствах электромагнитных, плазменных, лазерных, фотохимических, ультразвуковых и других физических воздействий на течение реакций;
- знание сущности оптимизации проведения химико-технологических процессов и комплексного использования сырья;
- знание основных аппаратов химической технологии;
- знание физико-химических и технологических закономерностей основных производств: кислот, солей, минеральных удобрений, металлов, нефтепродуктов, основных органических и высокомолекулярных соединений;
- знание принципов построения типовых математических моделей химико-технологических процессов, методов оптимизации и выбора критерия оптимальности;
- знание путей охраны природы от выбросов химических производств и задач безотходных производств;
- умение составлять схемы и рассчитывать движение материальных и энергетических потоков;
- умение определить селективность процесса, выход продукции, коэффициенты использования сырья и энергии;
- умение на основании термодинамического и кинетического анализа процесса указать оптимальные условия промышленного синтеза и дать схему реализации основных технологических принципов: принципы наилучшего использования сырья, аппаратуры, энергии; принципа максимальной движущей силы и принципа технологической соразмерности.

ПРОГРАММА
дисциплины
«ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс химической технологии в университетском образовании является важной дисциплиной, завершающей базовую подго-

товку студентов по химическим наукам. Он раскрывает значение химической науки и технологии в развитии производительных сил общества и решения экологических проблем. В соответствии с требованиями базового высшего образования *бакалавр* химии должен иметь: общие представления о многообразии и структуре химических производств, обладать знанием типовых химико-технологических процессов и лежащих в их основе физико-химических закономерностей, основных типах используемых в технологии конструкционных и функциональных материалах, обладать навыками оценки технологических решений по критериям эффективности использования сырья и энергоресурсов, экологической безопасности и экономической целесообразности.

Программа курса включает в себя три составные части. Первая характеризует значимость и место химической технологии в современной техносфере. В сжатой форме раскрываются ресурсные, энергетические и экологические предпосылки в развитии и ограничении химических производств. Даются базовые представления об иерархии химико-технологических систем, вводятся критерии эффективности их функционирования. Вторая часть посвящена теоретическому базису химической технологии. Анализируется обобщенное уравнение переноса импульса, энергии и массы, запись его для определенных технологических условий и режимов, вывод расчетных формул для конструкций и аппаратов. Третья часть курса знакомит студентов с конкретными химическими производствами. При рассмотрении важнейших химических производств анализируются принципы организации технологической схемы, выбор технологических режимов и аппаратурного оформления процесса, использование специальных конструкционных и функциональных материалов, решение задач ресурсо- и энергосбережения, а также задачи охраны окружающей среды.

Программа рассчитана на сочетание работы в аудитории (лекции, семинары, коллоквиум, лабораторные работы) с самостоятельной работой студента (работа с литературой, выполнение индивидуальных заданий, подготовка к лабораторным занятиям). В лекционном курсе рассматриваются лишь основополагающие и наиболее трудные для усвоения вопросы программы. Важную функцию в изучении предмета химической технологии помимо лекционного курса, несут лабораторные и семинарские занятия. Путем выполнения экспериментальных работ на модельных установках студенты изучают основные закономерности классических технологических

процессов и приобретают навыки использования базовых математических моделей процессов при интерпретации экспериментальных данных. На семинарские занятия выносятся более подробное рассмотрение теоретических основ химической технологии, решение расчетных задач, составление и анализ материальных, энергетических и эксергетических балансов. В конце курса предусматривается написание, оформление и защита студентом реферата по выбранному химическому производству.

Общие вопросы химической технологии

Роль и масштабы использования химико-технологических процессов в различных сферах материального производства. Тенденции развития техносферы и возрастающее значение проблем ресурсо- и энергосбережения, обеспечения безопасности химических производств, охраны окружающей среды.

Химическое производство как сложная система. Многоуровневая структура технологических систем: молекулярные процессы – макрокинетика – аппараты – производства – глобальные проблемы развития техносферы. Основные этапы создания химико-технологических систем (ХТС); принципы и стратегия системного подхода. Роль математического моделирования в решении задач проектирования и эксплуатации ХТС.

Химико-технологический процесс. Химическая и технологическая концепции производства. Техноэкономические показатели. Использование законов химической кинетики и термодинамики при выборе технологического режима.

Сырьевая база химической промышленности. Классификация сырья. Возобновляемые и невозобновляемые сырьевые ресурсы. Рациональное и комплексное использование сырьевых ресурсов. Материальные расчеты химико-технологических процессов. Методика составления материального баланса. Особенности составления материальных балансов для реакций разных технологических классов. Теоретические и практические расходные коэффициенты по различным видам сырья. Выход продукта. Интегральная и дифференциальная селективность химико-технологического процесса. Расчет производительности, пропускной способности, конверсии реагентов, селективности образования целевого продукта, выхода продукта в расчете на поданное и превращенное сырье.

Энергетическая база химической промышленности. Основные направления повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

Основные направления повышения эффективности использования сырьевых и энергетических ресурсов. Комплексное использование сырья. Рециклы веществ и материалов. Энерготехнологические схемы производств.

Критерии термодинамической эффективности технологических систем. Термодинамическая неравноценность различных форм энергии. Эксергия как мера потенциальной работоспособности системы. Уравнение баланса эксергии.

Вода как сырье и компонент химического производства. Промышленная водоподготовка.

Химическая технология и материаловедение. Современная систематика материалов по составу, свойствам и функциональному назначению. Функциональные материалы в химической технологии: мембраны, катализаторы, адсорбенты, электроды, сенсоры, покрытия и др. Конструкционные материалы в химической технологии. Материал как фактор, лимитирующий применение экстремальных физических воздействий в технологии. Химическое сопротивление металлических и неметаллических материалов. Основные виды неметаллических конструкционных материалов; полимеры и специальная керамика как альтернатива традиционным конструкционным материалам. Роль новых материалов в синтезе эффективных технологических схем и интенсификации технологических процессов.

Научеёмкие технологии – технологии будущего. Термодинамические совершенные энерготехнологические процессы, управление реакционной способностью веществ, селективный катализ, использование сверхкритических сред, нанотехнологии и создание наноматериалов. СВС-синтез, криотехнологии, золь-гель технологии – новые направления развития химической промышленности.

Теоретические основы химической технологии

Макроскопическая теория физико-химических явлений – теоретическая база химической технологии. Основные микро- и макроскопические переменные параметры, характеризующие перенос и превращение субстанции: импульса, массы и энергии. Обобщенная форма дифференциальных уравнений баланса. Конвектив-

ный и молекулярный перенос субстанции. Характеристика коэффициентов переноса. Частные формы дифференциальных уравнений баланса импульса, массы и энергии.

Гидравлика. Дифференциальные уравнения движения сплошных сред. Уравнение Навье-Стокса. Реологические свойства жидких фаз. Стационарные и нестационарные потоки. Характеристики ламинарных и турбулентных течений. Частные случаи решения основного уравнения переноса импульса: уравнение неразрывности потока, уравнение Бернулли, закон Паскаля. Физический смысл слагаемых в полученных уравнениях и применение для решения технологических задач. Гидродинамический напор.

Теория подобия как основа моделирования физических процессов. Теоремы подобия. Подобное преобразование дифференциальных уравнений. Гидродинамическое подобие. Использование теории подобия для решения основного уравнения переноса субстанции на примере переноса импульса. Критерии Рейнольдса, Фруда, Эйлера. Потерянный напор. Уравнение Гагена-Пуазейля.

Тепловые процессы в химической технологии. Способы распространения теплоты: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение. Уравнение Фурье-Кирхгоффа. Передача тепла теплопроводностью и конвекцией. Теплоотдача. Подобие теплообменных процессов, критерий Нуссельта. Термическое сопротивление. Уравнения теплопереноса, физический смысл сомножителей уравнения. Тепловой баланс. Расчет коэффициента теплопередачи, температурного напора, площади теплообмена. Теплообменные аппараты.

Массообменные процессы. Массообменные процессы, реализуемые в химической технологии. Классификация массообменных процессов по принципу участия фаз. Массоотдача и массопередача. Материальный баланс массообменных процессов. Основное уравнение переноса массы – уравнение Фика. Уравнения переноса вещества в контактирующих фазах. Расчет движущей силы массообменных процессов. Расчет коэффициентов конвективной массоотдачи, критерий Нуссельта. Оценка площади фазового контакта. Высота и число единиц переноса. Моделирование стационарного процесса абсорбции. Законы фазового равновесия абсорбционных процессов. Материальный баланс абсорбции. Расчет минимального расхода поглотителя. Тепловой баланс и способы промышленной организации абсорбционных процессов.

Перегонка жидкостей как способ очистки и разделения жидких фаз в химической технологии. Использование термодина-

мического равновесия в системах жидкость-пар для оценки движущей силы массообмена. Непрерывная ректификация. Материальный баланс ректификационной колонны Построение рабочих линий укрепляющей и исчерпывающей частей колонны. Определение числа теоретических тарелок. Тепловой баланс ректификационных колонн.

Мембранная технология разделения смесей веществ. Равновесные и кинетические факторы, определяющие эффективность мембранного разделения. Конструкция мембранных аппаратов.

Химические реакторы.

Математические модели химических реакторов и их уровни. Структура балансовых уравнений. Классификация химических реакторов. Уравнение материального баланса по веществу для химического реактора. Математическая модель реакторов с идеальной структурой потока. Реактора идеального смешения и вытеснения. Расчет времени пребывания в реакторе и концентрации реагента на выходе из реактора Критерии оценки эффективности и выбора типа реактора. Каскад реакторов. Реактора с неидеальной структурой потока. Диффузионная и ячеечная модели. Распределение времени пребывания в проточных реакторах.

Гетерогенно-каталитические процессы в химической промышленности Основные стадии и кинетические особенности гетерогенно-каталитических процессов. Типы промышленных каталитических реакторов и структура протекающих в них процессов. Математическое моделирование и оптимизация каталитических реакторов.

Важнейшие группы химических производств

Технология связанного азота. Альтернативные варианты перспективного решения связывания атмосферного азота. Структура современного производства аммиака из природного газа. Многоступенчатая схема приготовления и очистки азотно-воздушной смеси. Особенности циркуляционной схемы синтеза аммиака; физико-химические основы выбора оптимальных условий синтеза; катализаторы в производстве аммиака.

Современная технологическая схема производства азотной кислоты. Технологические решения, способствующие высокому выходу продукта. Физико-химические основы и аппаратурное

оформление процессов селективного окисления аммиака, оксидов азота и их абсорбции. Каталитическое обезвреживание отходящих газов. Сопряженные с синтезом аммиака производства – получение нитрата аммония и карбамида. Технологические схемы, свойства продуктов и области их применения.

Переработка фосфорсодержащего сырья. Виды фосфорсодержащего сырья. Различия минералогического состава и свойств, определяющие выбор способа технологической переработки: кислотного, термического, гидротермического. Современное состояние производства и потребления фосфора и фосфорных кислот. Электротермический способ получения элементарного фосфора. Физико-химические основы разложения природных фосфатов серной, азотной кислотами. Экстракционная фосфорная кислота, как основа производства минеральных удобрений. Состав и концентрация образующейся фосфорной кислоты в зависимости от температуры и способа разложения апатита. Выделение и утилизация фтористых газов. Фосфогипс – отход производства экстракционной фосфорной кислоты – потенциальный источник сырья для получения серной кислоты и построения замкнутых циклов в производстве удобрений.

Производство серной кислоты. Современное состояние производства серной кислоты из различных видов сырья. Физико-химические основы производства серной кислоты из серосодержащих руд. Особенности технологических схем и аппаратного оформления. Экологические проблемы в сернокислотном производстве.

Производство солей и удобрений. Основы технической переработки природных рассолов и твердых солей. Физико-химические основы процессов растворения и кристаллизации солей. Производство калийных солей. Схемы и аппараты для получения хлористого калия из сильвинита. Синтез мочевины. Технологические условия и схемы производства. Процессы производства концентрированных удобрений.

Электрохимические производства. Технологические особенности процессов электролиза водных растворов и расплавов солей, Типы промышленных электролизеров: с твердым катодом (диафрагменный и мембранный); с ртутным катодом; для электролиза расплавов хлоридов щелочных металлов.

Электрохимическое получение водорода. Уровень энергозатрат электрохимических производств и их доля в себестоимости продукции.

Металлургия. Типы пиро- и гидрометаллургических процессов. Производство чугуна. Процессы выплавки стали. Ферросплавы и специальные сплавы. Производство и применение алюминия, титана и меди и других металлов.

Производство редких и радиоактивных элементов и веществ высокой чистоты. Производство урана, плутония и их изотопов. Основные процессы получения веществ высокой чистоты ионообменными, дистилляционными, электрохимическими и другими методами.

Технология силикатов и вяжущих веществ. Производство стекла. Основные виды стекла и их назначение. Процессы варки стекла. Химические стекла, эмали, ситаллы, пеностекло, стекловолокно, керамика разного функционального назначения.

Переработка углеродсодержащего сырья. Использование нефти, природного газа и угля в качестве сырья химических производств. Переработка сырья на синтез-газ, парафины ароматические углеводороды.

Переработка нефти. Первичные и вторичные процессы нефтепереработки. Крекинг. Производство углеводородов. Термический и термоокислительный пиролиз газообразных и жидких углеводородов.

Технология высокомолекулярных соединений. Пластмассы, каучуки, химические волокна и полимерные композиционные материалы. Поликонденсационные процессы и их технологическое оформление. Фенолоформальдегидные, наволачные и резольные смолы. Кремний-органические полимеры.

Биотехнология. Роль химической технологии в организации биотехнологических производств. Биотехнология – перспективное направление технологии, базирующейся на достижениях генной инженерии, промышленной микробиологии и биокатализа. Технология рекомбинантных ДНК и производство белков. Биотехнология в решении проблем фиксации азота в почвах, добычи цветных металлов, переработки биомассы, очистки сточных вод.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
лекций, лабораторных работ, семинарских и
практических занятий

№ не- дели	Содержание занятий	Коли- чество часов
1	<p><u>Лекция 1.</u> Химическая технология – наука о наиболее экономичных и экологически обоснованных методах химической переработки природных материалов. Основные тенденции развития химической промышленности. Теоретическая база химической технологии. Вывод основного дифференциального уравнения переноса субстанции.</p> <p><u>Семинар 1.</u> Материальный баланс технологических процессов.</p> <p><u>Практическое занятие 1.</u> Решение задач.</p>	2 2 2
2	<p><u>Лекция 2.</u> Вывод уравнения конвективного переноса массы, энергии и импульса. Преобразования основного уравнения переноса субстанции. Уравнение Навье – Стокса.</p> <p><u>Семинар 2.</u> Гидромеханические процессы. Гидростатика.</p> <p><u>Практическое занятие 2.</u> Решение задач.</p>	2 2 2
3	<p><u>Лекция 3.</u> Основы теории подобия. Гидродинамическое подобие. Дифференциальные уравнения движения Эйлера. Уравнение Бернулли и его применение для решения технологических задач.</p> <p><u>Семинар 3</u> Гидромеханические процессы. Гидродинамика</p> <p><u>Практическое занятие 3.</u> Решение задач.</p>	2 2 2
4	<p><u>Лекция 4.</u> Теплопередача. Виды передачи тепла. Тепловые балансы. Молекулярный и конвективный перенос.</p> <p><u>Семинар 4.</u> Тепловые процессы в химической технологии</p> <p><u>Практическое занятие 4.</u> Решение задач.</p>	2 2 2

№ недели	Содержание занятий	Количество часов
5	<u>Лекция 5.</u> Массообменные процессы. Массопередача и массоотдача Характеристика процессов массопередачи. Уравнение рабочей линии массообменных аппаратов. Подобие процессов массоотдачи.	2
	<u>Семинар 5.</u> Массообменные процессы.	2
	<u>Практическое занятие 5.</u> Решение задач.	2
6	<u>Лекция 6.</u> Абсорбция. Материальный и тепловой баланс абсорбции. Движущая сила абсорбционных процессов. Высота и число единиц переноса. Устройства абсорбционных аппаратов.	2
	<u>Семинар 6.</u> Абсорбция. Устройство и принцип действия абсорбционных аппаратов	2
	<u>Практическое занятие 6.</u> Решение задач.	2
7	<u>Лекция 7.</u> Ректификация. Расчет высоты ректификационной колонны. Теоретическая минимальная работа разделения.	2
	<u>Семинар 7.</u> Ректификация.	2
	<u>Практическое занятие 7.</u> Решение задач.	2
8	<u>Лекция 8.</u> Общая химическая технология – важнейшая область знаний и практической деятельности. Важнейшие технологические понятия и определения. Химико-технологический процесс и его содержание.	2
	<u>Коллоквиум</u> Основные процессы и аппараты химической технологии. Распределение тем рефератов.	4
9	<u>Лекция 9.</u> Термодинамические расчеты химико-технологических процессов.	2
	<u>Семинар 8.</u> Характеристики химико-технологического процесса	2
	<u>Практическое занятие 8.</u> Решение задач.	2

№ недели	Содержание занятий	Количество часов
10	<p><u>Лекция 10.</u> Использование законов кинетики при выборе технологического режима. Зависимость скорости химических реакций от концентрации реагентов. Общие сведения о химических реакторах.</p> <p><u>Семинар 9.</u> Кинетический и термодинамический анализ химических процессов в технологии.</p> <p><u>Практическое занятие 9.</u> Решение задач.</p>	<p>2</p> <p>2</p> <p>2</p>
11	<p><u>Лекция 11.</u> Классификация химических реакторов и режимов их работы. Уравнения материального баланса реакторов идеального смешения и вытеснения.</p> <p><u>Семинар 10.</u> Химические реакторы.</p> <p><u>Практическое занятие 10.</u> Решение задач.</p>	<p>2</p> <p>2</p> <p>2</p>
12	<p><u>Лекция 12.</u> Химические реакторы с неидеальной структурой потоков. Теплоперенос в химических реакторах. Гетерогенные процессы.</p> <p><u>Лабораторная работа 1.</u> Получение хлорида калия из сильвинита методами растворения и раздельной кристаллизации.</p>	<p>2</p> <p>4</p>
13	<p><u>Лекция 13.</u> Основные технологические принципы: принцип максимальной движущей силы, принцип максимального использования сырья, энергии, аппаратуры, принцип технологической соразмерности.</p> <p><u>Лабораторная работа 2.</u> Изучение кинетики обжига серного колчедана.</p>	<p>2</p> <p>4</p>
14	<p><u>Лекция 14.</u> Химическое производство как сложная система. Основные этапы создания химико-технологических систем. Общая стратегия системного подхода. Структурная иерархия технологических систем. Математическое моделирование.</p> <p><u>Лабораторная работа 3.</u> Моделирование химических реакторов.</p>	<p>2</p> <p>4</p>

№ недели	Содержание занятий	Количество часов
15	<u>Лекция 15.</u> Химическая технология и материаловедение. Функциональные материалы в химической технологии: катализаторы, адсорбенты, электроды, сенсоры и др.	2
	<u>Практическое занятие 11.</u> Завершение лабораторных работ.	4
16	<u>Лекция 16.</u> Новые технологии в химической промышленности. Мембранные технологии. «Микробиологическая» металлургия. Нанотехнологии.	2
	<u>Практическое занятие 12.</u> Защита рефератов.	4
17	<u>Лекция 17.</u> Производство метанола	2
	<u>Практическое занятие 13.</u> Зачет	4

Планы семинарских занятий по курсу «Химическая технология»

Семинар 1. Материальный баланс технологических процессов

1. Цель проведения материальных расчетов химико-технологических процессов. Принципы составления материального баланса. Закон сохранения массы и закон стехиометрических соотношений – основа составления материального баланса.
2. Теоретический материальный баланс. Графическое представление сложных химических превращений. Расчет текущей концентрации компонентов. Теоретические расходные коэффициенты
3. Практический материальный баланс. Составление материального баланса работы производства. Приходная и расходная часть материального баланса.

Задачи и упражнения

1. Определить теоретические расходные коэффициенты железных руд, используемых при выплавке чугуна, содержащего 92% Fe, при условии что в рудах не присутствует пустая порода и примеси. Железные руды: шпатовый железняк FeCO_3 ; лимонит $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; гетит $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; красный железняк Fe_2O_3 ; магнитный железняк Fe_3O_4 . *Ответ:* 1905,8 кг, 1534,7 кг, 1460,6 кг, 1314,2 кг, 1270,0 кг на 1т чугуна соответственно.

2. Рассчитать расходный коэффициент природного газа, содержащего 97%(об.) метана в производстве уксусной кислоты (расчет вести на одну тонну продукта)из ацетальдегида. Выход ацетилена из метана – 15% от теоретического, ацетальдегида – 60%, а уксусной кислоты – 90%. *Ответ:* 9500 м³.

3. Определить теоретические расходные коэффициенты фосфорита, содержащего 30% P_2O_5 и 70% H_3PO_4 (по P_2O_5) на одну тонну двойного суперфосфата. *Ответ:* 563,5 кг.

4. Рассчитать расходные коэффициенты по сырью в производстве 1т фосфата аммония $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$. Исходная фосфорная кислота имеет концентрацию58%, а аммиак содержит 2% влаги. *Ответ:* 1133,97 кг раствора кислоты; 349,3 кг технического аммиака

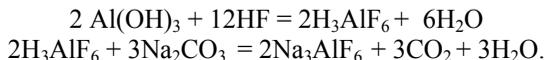
5. Составить баланс печи сжигания серы производительностью 60 т/сутки. Степень окисления серы 0,95 (остальная сера возгоняется и сгорает вне печи). Коэффициент избытка воздуха 1,15. Расчет следует вести на производительность печи по сжигаемой сере в кг/час. *Ответ:* итого17760кг.

6. Составить материальный баланс производства криолита (на 1т продукта), если процесс описывается следующим суммарным уравнением:



Плавииковую кислоту применяют в виде 15% раствора фтороводорода в воде. Соду берут с 4% недостачи от стехиометрического соотношения для обеспечения необходимой остаточной кислотности.

Протекающие при образовании криолита реакции могут быть выражены уравнениями:



Ответ: итого 5119 кг.

7. Составить материальный баланс и рассчитать выход SO_2 при обжиге 1т руды, содержащей 22% массовых долей серы в виде сульфида цинка. Все остальное в руде балласт – несгораемые при-

меси. В производстве используется полуторократный избыток воздуха по отношению к стехиометрическому. В огарке содержится 0,5% массовых долей серы. *Ответ:* баланс приходной части 3124,37 кг.

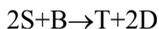
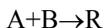
8. Составить стехиометрический баланс для процесса:



если начальная концентрация реагента А 12 моль/л, текущие концентрации веществ А – 0,5 моль/л, С – 0,5 моль/л, Д – 1,5 моль/л.

Ответ: $C_B=2$ моль/л.

9. Составить стехиометрический баланс для процесса:



если начальная концентрация реагента А составляет 2, а реагента В – 1,7 моль/л. Текущие концентрации веществ : А – 0,1; В – 0,5; Т – 0,15 D – 0,05 моль/л. *Ответ:* $C_R=1,05$, $C_S=0,25$ моль/л

Семинар 2. Гидромеханические процессы. Гидростатика

1. Физические и реологические свойства жидких сред.
2. Преобразование уравнений Навье-Стокса для описания подвижных и неподвижных сред
3. Основное уравнение гидростатики и его практическое использование.

Задачи и упражнения

1. Напишите основное уравнение переноса субстанции. Охарактеризуйте молекулярный и конвективный перенос.
2. Напишите законы, описывающие молекулярный перенос массы, энергии и импульса, и объясните причину их сходства.
3. Напишите уравнение неразрывности с использованием субстанциональной производной. Раскройте физический смысл этой производной.

4. Преобразованием уравнения Эйлера выведите основное уравнение гидростатики. Для решения каких практических задач оно применимо?

5. Получите выражение закона Паскаля при условии равновесия в сообщающихся сосудах для следующих условий: а) оба сосуда открыты и заполнены однородной жидкостью с плотностью ρ ; б) оба сосуда открыты и заполнены разными жидкостями, причем $\rho_1 > \rho_2$; в) оба сосуда заполнены однородной жидкостью, один из сосудов закрыт и давление в нем больше $P_1 > P_2$.

6. Определите плотность диоксида серы при избыточном давлении 10 кгс/м^2 и температуре 20°C . Атмосферное давление 760 мм рт. ст. *Ответ:* $28,5 \text{ кг/м}^3$.

7. В открытом резервуаре находится жидкость. На высоте $2,52 \text{ м}$ от уровня жидкости к стенке резервуара присоединен манометр, который показывает избыточное давление $0,31 \text{ кгс/см}^2$. Определите относительную плотность жидкости. *Ответ:* $1,23$.

8. На большой поршень гидравлического пресса, диаметр которого d_1 равен 1 м , поместили груз массой 80 кг . Поршень опустился на некоторую высоту h_1 . После установления равновесия в системе маленький поршень поднялся на высоту h_2 . Определите значение h_1 и h_2 , если гидравлическая система заполнена водой, а диаметр маленького поршня d_2 равен 10 см .

9. Определите горизонтальную силу, действующую на плотину длиной 1000 м при высоте воды перед плотиной 100 м , а за плотиной 10 м . *Ответ:* $48,56 \text{ ГН}$.

10. Вначале в U-образную трубку налили ртуть, а затем в одно колено трубки – воду, а в другое бензин. При совпадении верхних уровней бензина и воды высота столба воды равна 43 см . Определите разность уровней ртути, если диаметры трубок колен одинаковы, плотность ртути 13600 кг/м^3 , плотность бензина 700 кг/м^3 . *Ответ:* 370 мм рт. ст.

Семинар 3. Гидромеханические процессы. Гидродинамика

1. Основные характеристики движения жидкостей. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Характеристики стационарных и нестационарных потоков.
2. Вывод уравнения неразрывности потока из основного уравнения переноса субстанции.

3. Уравнение Бернулли и его практическое применение. Определение потеряннного напора из уравнения Гагена-Пуазейля.
4. Основы теории подобия. Подобное преобразование дифференциальных уравнений движения. Физический смысл критериев гидродинамического подобия.

Задачи и упражнения

1. Сформулируйте закон внутреннего трения Ньютона. Раскройте понятие динамической и кинематической вязкости жидкости.

2. Охарактеризуйте структуру ламинарного и турбулентного режима движения потока. Сформулируйте основные различия ламинарного и турбулентного течения.

3. В каких случаях используют понятие гидравлического радиуса и эквивалентного диаметра?

4. Что называется гидравлическим напором? Его связь с геометрическим, пьезометрическим и скоростным напорами.

5. Как рассчитывают потери напора на трение и местное сопротивление в трубопроводах и аппаратах?

6. В чем состоит принцип гидравлических методов измерения расходов жидкостей и газов?

7. В чем заключается принцип моделирования технологических процессов? Укажите сходство и различие основных способов моделирования – метода обобщенных переменных и математического моделирования.

8. Как преобразуют дифференциальные уравнения, описывающие сложные процессы переноса, методами теории подобия? Приведите обобщенные (критериальные) уравнения.

9. Назовите основные критерии подобия гидродинамических процессов. Укажите их физический смысл. Перечислите определяющие и определяемые критерии.

10. Определите режим течения воды в кольцевом пространстве теплообменника типа «труба в трубе». Наружная труба - $96 \times 3,5$ мм, внутренняя - 57×3 мм, расход воды $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, средняя температура воды 20°C . *Ответ:* переходный режим.

11. Определите гидравлический радиус для трубы с внутренним сечением 421 мм , работающей а) полным сечением; б) когда труба заполнена жидкостью только на половину сечения. *Ответ:* 103 мм .

12. Определите максимальную и рабочую скорость воды плотностью 1000 кг/м^3 , протекающей по трубопроводу с диаметром 412 мм при температуре 20°C , если разность полного и пьезометрического напоров по ртутному дифманометру равна 20 мм рт. ст.
Ответ: 2,22 м/с, 1,97 м/с.

13. По горизонтальному, гидравлически гладкому трубопроводу с внутренним диаметром 152 мм протекает вода при температуре 20°C со средней скоростью 1,3 м/с. В трубопроводе установлена нормальная диафрагма, диаметр отверстия которой равен 83,5 мм. Определите показание ртутного дифманометра диафрагмы.
Ответ: 0,187 м.

14. Из отверстия диаметром 10 мм в дне открытого бака, в котором поддерживается постоянный уровень жидкости высотой 900 мм, вытекает 750 дм^3 жидкости в час. Определите коэффициент расхода. Через какой промежуток времени опорожнится бак, если прекратить подачу в него жидкости? Диаметр бака 800 мм.
Ответ: $\alpha = 0,636$, $\tau = 1,2 \text{ ч}$.

15. Определите потерю напора в прямом трубопроводе длиной 1000 м, по которому прокачивается нефтепродукт с плотностью 900 кг/м^3 в количестве 31,4 л/с. Внутренний диаметр трубопровода 200 мм, коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda = 0,04$.
Ответ: 90 кПа.

16. Какой должен быть взят геометрический масштаб модели, если в промышленном аппарате рабочая жидкость – нефть, а в модели – вода, кинематический коэффициент вязкости которой в 50 раз меньше, чем у нефти? Какую скорость надо дать воде в модели, если скорость нефти в промышленном аппарате 1 м/с? Моделируется одновременно силы трения и силы тяжести.
Ответ: 0,27 м/с, 1:13,5.

17. По змеевику, сделанному из бывшей в употреблении стальной трубы диаметром $43 \times 2,5$ мм проходит вода со скоростью 1 м/с при температуре 30°C . Диаметр витка змеевика равен 1 м, число витков – 10. Определите потерю давления на трение в змеевике.
Ответ: 14,76 кПа.

18. В лабораторных условиях для изучения технологического процесса была изготовлена геометрическая модель промышленного аппарата в масштабе 1:10. В лабораторной модели предполагается применять в качестве рабочего вещества воздух атмосферного давления с температурой 22°C . В производственном аппарате будет использоваться горячий воздух, движущийся со скоростью

Зм/с под атмосферным давлением при температуре 100 °С. Возможно ли в этих условиях получить полное гидравлическое подобие (подобие сил трения и сил тяжести). Какова должна быть скорость воздуха в геометрической модели при соблюдении подобия сил трения?

Семинар 4.Тепловые процессы в химической технологии

1. Виды передачи тепла. Тепловые балансы.
2. Преобразование уравнения Фурье-Кирхгоффа при описании передачи тепла теплопроводностью.
3. Преобразование уравнения Фурье-Кирхгоффа при описании передачи тепла конвекцией. Критерий Нуссельта
4. Смешанный механизм переноса тепла. Сложение термических сопротивлений.

Задачи и упражнения

1. Какие виды переноса тепла участвуют в теплообмене?
2. От каких факторов зависит излучательная способность тела? Как её определяют?
3. Что называется изотермической поверхностью и температурным градиентом?
4. Дайте определение понятиям теплота, тепловой, поток, удельный тепловой поток, укажите их размерность. Докажите, что при стационарном режиме теплообмена удельный тепловой поток есть величина постоянная.
5. Из каких компонентов складывается термическое сопротивление системы. Как связан коэффициент теплопередачи с термическим сопротивлением?
6. Что называют тепловым подобием? Используя положения теории физического моделирования, выведите определяющие и определяемые критерии теплового подобия.
7. Запишите основное уравнение теплопередачи, раскройте физический смысл множителей и укажите способы их расчета.
8. Выведите уравнение расчета движущей силы процессов в теплообменных аппаратах. Сопоставьте движущие силы и расходы теплоносителей при прямоточном и противоточном движении теплоносителей в теплообменнике.
9. Во сколько раз увеличится термическое сопротивление стенки стального змеевика, свернутого из трубы диаметром

38×2,5 мм, если покрыть его слоем эмали толщиной 0,5 мм. Считать стенку плоской. Коэффициент теплопроводности стали 46,5 Вт/(м·К). *Ответ:* 10 раз.

10. Паропровод длиной 40 м диаметром 51×2,5 мм изолирован слоем пробки толщиной 30 мм. Температура поверхности внутри паропровода 175°C, поверхности изоляции снаружи – 45°C. Определить количество теплоты, теряемое в 1 час поверхностью паропровода. Коэффициенты теплопроводности стали и изоляции равны соответственно 46,5 Вт/(м·К) и 1,05 Вт/(м·К). *Ответ:* $1,7563 \cdot 10^7$ Дж.

11. Слой льда на поверхности воды имеет толщину 250 мм. Температура на нижней и верхней поверхности равны 0°C и –15°C. Определите тепловой поток через 1 м² поверхности льда, если коэффициент теплопроводности составляет 2,25 Вт/(м·К). Как изменится тепловой поток, если лед покрывается слоем снега толщиной 155 мм с коэффициентом теплопроводности 0,465 Вт/(м·К), а температура на поверхности снега опустится до –20°C. *Ответ:* 135 Вт/м², 45 Вт/м².

12. Стенка обжиговой печи построена из огнеупорного и строительного кирпича с коэффициентами теплопроводности 0,45 Вт/(м·К) и 0,35 Вт/(м·К). Толщина кладки составляет 120 мм и 200 мм соответственно. Определите потери в окружающую среду, температуру на границе слоев, если температура внутренней поверхности стенки 1200°C, а наружной 150°C. *Ответ:* 1256 Вт/м², 866°C.

13. Горячий концентрированный раствор, выходящий из выпарного аппарата с температурой 106°C, используется для подогрева до 50°C холодного разбавленного раствора, поступающего на выпарку с температурой 15°C. В теплообменнике концентрированный раствор охлаждается до 60°C. Определите температурный напор при прямоточном и противоточном движении растворов. *Ответ:* противоточный 50,5°C, прямоточный 36,8°C.

14. 1930 кг/ч бутилового спирта необходимо охлаждать от 80 до 50°C в противоточном обменнике поверхностью 6 м². Охлаждение проводится водой с начальной температурой 18°C. Коэффициент теплопередачи в теплообменнике $K = 230$ Вт/м² К; Δt_{cp} – считать как среднее арифметическое. Определите расход воды. *Ответ:* 4,2 м³/ч.

15. Вычислите коэффициент теплоотдачи для воды, подогреваемой в трубчатом теплообменнике, состоящим из труб диаметром

40×2,5 мм. Вода идет по трубам со скоростью 1 м/с. Средняя температура воды 47,5°C. Температура стенки трубы 95°C; длина трубы 2 м. Принять, что при рабочей температуре воды 47,5°C коэффициент теплопроводности воды 0,643 Вт/(м·К), динамический коэффициент вязкости $0,57 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность 989 кг/м³. *Ответ:* 5 510 Вт/(м²К).

Семинар 5. Массообменные процессы

1. Массообменные процессы в химической технологии. Массообмен и массопередача.
2. Материальный баланс процессов массопередачи. Построение рабочей линии работы массообменного аппарата.
3. Использование фазовых равновесий для расчета движущей силы массопередачи.
4. Основное уравнение переноса массы. Уравнение Фика.
5. Подобие массообменных процессов.

Задачи и упражнения

1. Какие процессы называются массообменными? Что является движущей силой массопередачи?
2. Перечислите основные способы выражения концентрации компонентов, используемые при расчете массообменных процессов. Выведите формулы перехода от одного способа выражения концентрации к другому.
3. Что называется рабочей линией процесса? Для чего используется построение рабочей линии массообменного аппарата?
4. Запишите основное уравнение массопередачи и раскройте физико-химический смысл коэффициента пропорциональности, укажите его единицы измерения.
5. Что называется высотой и числом единиц переноса? Как рассчитываются и используются эти технологические характеристики для выбора и разработки массообменного аппарата?
6. Жидкая смесь содержит 58,8 мол.% толуола и 41,2 мол.% четыреххлористого углерода. Определите относительную массовую концентрацию толуола и его объемную массовую концентрацию.

цию. *Ответ:* 0,853 кг толуола/кг четыреххлористого углерода, 535,6 кг толуола/м³ смеси.

7. Жидкость, состоящая из смеси 30% масс. бензола, 45% масс. толуола и 25% масс. о-ксилола, нагрета до 100 °С. Найдите равновесный состав пара над жидкостью, если известно, что при этой температуре давление паров чистого бензола составляет $1,78 \cdot 10^5$ Па, толуола $0,75 \cdot 10^5$ Па и о-ксилола $0,29 \cdot 10^5$. *Ответ:* бензол – 61,3 %, толуол – 32,8 %, о-ксилол – 5,9%

8. Воздух атмосферного давления, содержащий 14%(об.) ацетилена, при температуре 25°С приведен в соприкосновение с водой, содержащей 0,29·10³ кг ацетилена на 1 кг воды. Определите: из какой фазы в какую будет переходить ацетилен, движущую силу процесса перехода в начальный момент времени в относительных мольных концентрациях. Атмосферное давление 765 мм рт. ст. Равновесные концентрации ацетилена в газовой и жидкой фазах определяются законом Генри. Коэффициент Генри при рабочих условиях составляет $1,01 \cdot 10^6$ мм рт.ст.

9. Рассчитайте движущую силу процесса взаимодействия аммиака с водой при проведении его в аппарате с движением фаз: а) при прямотоке, в) при противотоке; с) при полном перемешивании жидкости. В процессе абсорбции, проводимой при давлении 0,1 МПа и температуре 27°С, концентрация аммиака в газе снижается от 4%(об.) до 0,8%(об.), а концентрация аммиака в воде увеличивается от 0,05 кмоль/м³ до 0,25 кмоль/м³. *Ответ:* а) 1400 Па, в) 1700 Па, с) 1300 Па.

10. В массообменном аппарате, работающем под давлением $P_{abc} = 3,1$ кгс/см², коэффициенты массоотдачи имеют следующие значения: $\beta_y = 1,07$ кмоль/(м²·ч(Δу=1)), $\beta_x = 22$ кмоль/(м²·ч(Δх=1)). Равновесные составы газовой и жидкой фаз характеризуются законом Генри $p^* = 0,08 \cdot 10^6 x$. Определите: коэффициент массопередачи по контактирующим фазам; во сколько раз диффузионное сопротивление жидкой фазы отличается от диффузионного сопротивления газовой фазы. *Ответ:* $K_y = 0,396$ кмоль/(м²·ч(Δу=1)), $K_x = 13,9$ кмоль/(м²·ч(Δх=1)); диффузионное сопротивление в жидкой фазе в 1,71 раз больше сопротивления газовой фазы.

11. Постройте линию равновесия процесса абсорбции двуокиси серы водой в координатах: мольных долей, относительной мольной концентрации, используя экспериментальные данные, полученные при температуре 20°С и давлении 760 мм ср. ст.

P(SO ₂) Мм ср.ст.	0,5	1,2	3,2	8,5	14,1	26	38	59	92
C(SO ₂) Г/100гH ₂ O	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5

Парциальное давление воды при температуре эксперимента 17 мм рт. ст.

12. В час поглощается чистой водой 1т диоксида серы из газов обжиговых печей, содержащих 5% (об.) SO₂. Степень поглощения SO₂ составляет 90 %. Количество орошаемой воды принять на 20% больше минимально необходимого. Общее давление, при котором ведется процесс 10⁵ Па. Температура процесса 20 °С. Определите среднюю движущую силу поглощения для обеспечения требуемой полноты извлечения SO₂. Для построения равновесной линии используйте табличные данные.

Ответ: 1710 Па.

Растворимость SO ₂ в частях на 100 частей H ₂ O	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02
Давление SO ₂ над раствором, Па	7850	5200	3460	1880	1120	426	160	67

Семинар 6. Абсорбция

1. Применение процессов абсорбции в химической технологии. Физико-химические основы процесса абсорбции.
2. Материальный баланс абсорбции и построение рабочей линии.
3. Классификация абсорберов.
4. Способы промышленной организации абсорбционных процессов.

Задачи и упражнения

1. Сформулируйте законы, описывающие процессы абсорбции и десорбции. Покажите особенности кинетики процессов абсорбции и хемосорбции. Для решения каких химико-технологических задач применяют эти закономерности?

2. Как составляется материальный баланс абсорбции? Раскройте понятие рабочей линии абсорбционного аппарата.

3. Что называется минимальным и оптимальным расходами абсорбента? Как влияет изменение удельного расхода на эффективность работы абсорбера?

4. Сопоставьте характеристики работы прямоточных и противоточных абсорберов.

5. Раскройте принцип действия пленочных абсорберов. В каких случаях применение этих аппаратов наиболее рационально?

6. Опишите принцип действия насадочных колонн. Почему насадку по высоте аппарата располагают секциями?

7. В каких случаях целесообразно использование схем установок с рециркуляцией абсорбента? Приведите примеры схем установок с однократным и многократным использованием абсорбента.

8. Газовая смесь углеводородов поступает в абсорбер с объемной скоростью $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ (считая при нормальных условиях). Определите теоретически минимальный расход жидкого поглотителя с молярной массой 224 кг/кмоль , необходимый для полного извлечения пропана и бутана из смеси. Содержание пропана в газе 15% (об.), бутана – 105% (об.). Температура в абсорбере 30°C , абсолютное давление 3 кгс/см^2 (294 кПа). Растворимость бутана и пропана в поглотителе характеризуется законом Рауля. Давление насыщенного пара пропана при 30°C 981 кПа , бутана – 265 кПа .
Ответ: 142 кмоль/ч .

9. В насадочном абсорбере диаметром 1 м двуокись серы поглощается водой из воздуха. Начальное содержание SO_2 в поступающей смеси 7% (об.). Степень поглощения газа $0,9$. На выходе из абсорбера вода содержит $0,0072 \text{ кг SO}_2/\text{кг H}_2\text{O}$. Коэффициент массопередачи в абсорбере $K_y = 0,005 \text{ кг SO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с кг SO}_2/\text{кг H}_2\text{O})$. Насадка из керамических колец $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$. Коэффициент смачивания насадки – 1 , высота единицы переноса $h_{\text{оу}} = 1,17 \text{ м}$. Определите расход воды в абсорбере, если удельная поверхность насадки составляет $87,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$.
Ответ: 30 т/ч .

10. Насадочный абсорбер для поглощения паров ацетона из воздуха орошается водой, расход которой составляет 3000 кг/ч . Температура воды 20°C . Через абсорбер пропускают смесь воздуха с парами ацетона, содержащую 6% (об.) ацетона, а чистого воздуха в этой смеси – $1400 \text{ м}^3/\text{ч}$. Степень абсорбции ацетона 98% . Найдите высоту абсорбционной башни, заполненной керамическими кольцами с удельной поверхностью $204 \text{ м}^2/\text{м}^3$, если коэффициент массопередачи $0,4 \text{ кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ на единицу разности кон-

центраций в газовой фазе, выраженной в киломолях ацетона на киломоль воздуха. Скорость газа принять равной 1,17 м/с. Линию равновесия при рабочих концентрациях считать прямой $Y^*=1,68X$.
Ответ: 16,9 м.

11. Определить необходимую поверхность контакта фаз в абсорбционной колонне для поглощения аммиака из смеси газов раствором серной кислоты. Парциальное давление аммиака в смеси (МПа): на входе в колонну 0,005, на выходе 0,001. Концентрация серной кислоты в абсорбере (кмоль/м³): на входе 0,6, на выходе 0,5. Частные коэффициенты массоотдачи: по газовой фазе 3,5 кмоль/(м³·ч·МПа), в жидкой фазе 0,005 м²/ч, $m = 750$ кмоль/(м²·МПа). Расход смеси газов 45 кмоль/ч; общее давление 0,1 МПа. Газ и жидкость движутся противотоком. *Ответ:* 245 м².

12. В насадочном абсорбере диаметром 1 м диоксид серы поглощается водой из воздуха. Начальное содержание SO₂ в поступающей смеси 7%(об.). Степень извлечения 0,9. На выходе из абсорбера вода содержит 0,0072 кг SO₂/кг воды. Коэффициент массопередачи в абсорбере 0,005 кг SO₂/(м²·с·(кг SO₂/кг воздуха)). Насадка из керамических колец имеет удельную поверхность 87,5 м²/м³. Коэффициент смоченности насадки равен 1. Высота единицы переноса 1,17 м. Определите расход воды в абсорбере. *Ответ:* 30 т/ч.

Семинар 7. Ректификация

1. Физико-химические основы разделения жидких смесей.
2. Ректификация. Непрерывная ректификация бинарных смесей.
3. Устройство ректификационных колонн. Основные характеристики.
4. Материальный баланс ректификационной колонны. Уравнения расчета ректификационных процессов.
5. Построение рабочих линий для укрепляющей и исчерпывающей частей ректификационной колонны. Определение теоретического и практического числа тарелок.
6. Периодическая и непрерывная ректификация. Ректификация многокомпонентной смеси.
7. Методы анализа работы ректификационной колонны и её расчет.

Задачи и упражнения

1. Что понимается под простой перегонкой жидкостей? Назовите виды простой перегонки.

2. Приведите схему процесса перегонки с дефлегмацией и укажите ее преимущества по сравнению с простой перегонкой.

3. Раскройте принцип составления материального баланса простой перегонки. Как определяется количество кубового остатка, дистиллята и его состава при простой перегонки?

4. Изобразите схему ректификационной колонны и укажите на ней потоки жидкости и пара. Изобразите схему установки непрерывной ректификации бинарной смеси.

5. Выведите уравнение рабочей линии для верхней и нижней частей ректификационной колонны.

6. Как определяется минимальное и рабочее флегмовое число? Как влияет оно на высоту ректификационной колонны?

7. В ректификационную колонну непрерывного действия подается 1000 кмоль/ч смеси, содержащей 30% (моль) пентана и 70% (моль) гексана. Верхний продукт содержит 95% (моль) пентана, нижний – 90% (моль) гексана. Тангенс угла наклона рабочей линии укрепляющей части колонны составляет 0,75. Определите количество верхнего и нижнего продуктов, получаемое за 1 час. *Ответ:* 17106,3 кг/ч, 64693,6 кг/ч.

8. 2600 кг смеси уксусной кислоты и воды подвергается простой перегонке под атмосферным давлением. Исходная смесь содержит 105(моль) уксусной кислоты, кубовой остаток – 50% (моль) уксусной кислоты. Определите массу остатка и дистиллята, состав дистиллята. Данные о равновесии бинарной системы вода-уксусная кислота при атмосферном давлении представлены по низкокипящему компоненту в мольных процентах:

T°С	118	115	114	110	107	105	104	103	102	101	100,6	100
x	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
y	0	9,2	16,7	30,2	42,5	53	62,6	71,6	79,5	86,4	93	100

9. В ректификационную колонну поступает 5000кг/ч смеси, состоящей из 29% (масс) метилового спирта и 71% (масс) воды. Уравнение рабочей линии в верхней части ректификационной колонны $y=0,73x+0,264$. Кубового остатка получается 3800кг/ч. Определите состав кубового остатка и количество пара, поступающего из верхней части колонны в дефлегматор. *Ответ:* 6,99% (масс), 4440 кг/ч.

10. 1000 кмоль/ч смеси бензола и толуола, содержащей 40% (моль) бензола, подвергается с целью получения дистиллята, содержащего 95% (моль) бензола, и остатка, содержащего 96,7% (моль) толуола. Определите количество получаемых продуктов, минимальное флегмовое число, число теоретических тарелок при $R = 1,47 R_{\min}$. (Данные о равновесных концентрациях смотрите в справочной литературе). *Ответ:* $R_{\min} = 1,5$, дистиллята 399,96 кмоль/ч, кубового остатка 600,04 кмоль/ч.

11. В ректификационной колонне непрерывного действия получается 200 кг/ч уксусной кислоты с концентрацией 70% (моль). Перерабатывается смесь уксусной кислоты с водой. Смесь поступает в колонну при температуре кипения. Содержание уксусной кислоты в исходной смеси 31% (моль). С верха колонны отгоняется вода, содержащая 8% (моль) уксусной кислоты. Давление в колонне атмосферное. Определите число теоретических тарелок колонны при флегмовом числе 4. Данные о равновесных составах смотрите в задаче 8. *Ответ:* 9.

12. Уравнение рабочих линий ректификационной колонны для разделения смеси бензола и толуола под атмосферным давлением имеют вид: $y=0,723x+0,263$; $y=1,250x-0,0188$. В колонну подается 75 кмоль/ч смеси при температуре кипения. Определите количество отводимых дистиллята и кубового остатка, а так же требуемую поверхность нагрева в кубе колонны, если коэффициент теплопередачи в кубе 580 Вт/(м²·К). Тепловыми потерями пренебречь, температуру кипения жидкости в кубе принять как для чистого толуола. *Ответ:* 3069,3 кг/ч; 3274,2 кг/ч.

13. Определите количество получаемых продуктов (в кмоль/ч) и действительное число тарелок в ректификационной колонне для получения уксусной кислоты из ее смеси с водой. Расход смеси 4500 кг/ч. Исходная смесь содержит 40% (масс), а дистиллят 72,9% (масс) воды. Кубовой остаток – 68,5% (масс) уксусной кислоты. Флегмовое число 2,3. Коэффициент полезного действия 80%. *Ответ:* 41,6 кмоль/ч; 103,38 кмоль/ч; 6,25.

Семинар 8. Характеристики химико-технологического процесса

1. Технологические критерии эффективности химико-технологического процесса.

2. Технологический процесс и технологическая схема.
3. Системный подход в исследовании химико-технологических процессов. Термодинамическая оценка совершенства технологического процесса.

Задачи и упражнения

1. Из каких основных стадий состоит химико-технологический процесс? В каких стадиях участвуют химические реакции?

2. Каковы пределы изменения степени превращения, выхода, селективности? В чем различие между действительной и равновесной степенями превращения реагента?

3. Что характеризует полная (интегральная) и мгновенная (дифференциальная) селективность?

4. Что такое эксергия? Как рассчитать эксергию реакционного потока?

5. В чем основное различие понятий «потеря энергии» и «потеря эксергии»? С какой целью в технике используют эксергетический КПД?

6. Протекают последовательные реакции $A \rightarrow 2R$ $R \rightarrow S$, целевым продуктом которых является вещество R. Определите выход продукта R, степень превращения реагента A и полную селективность, если известен конечный состав реакционной смеси: $C_A = 1 \text{ кмоль/м}^3$, $C_R = 2 \text{ кмоль/м}^3$, $C_S = 2 \text{ кмоль/м}^3$.

7. В основе технологического процесса лежит реакция $2A + 3B = R$. С целью более полного использования дорогостоящего вещества A в реактор подается избыток вещества B, в 2 раза большей, чем требуется по стехиометрии. Определите степень превращения реагента B, если степень превращения реагента A 0,9. *Ответ: 0,45*

8. Газофазная реакция $A + 3B = 2R$ протекает при постоянном давлении. Исходные концентрации A, B и R равны соответственно 0,4; 0,5 и 0,1 молярной доли. В продуктах содержится 0,6 мольной доли продукта R. Определите концентрации других веществ и степень превращения реагента B.

9. Газофазная реакция $A + 3B = R$ протекает при постоянном давлении. Исходные концентрации A, B и R равны соответственно 0,5; 0,3 и 0,2 молярной доли. В продуктах содержится 0,4 мольной доли продукта R. Определите концентрации других веществ и

степень превращения реагента В. *Ответ:* мольные доли веществ А и В 0,56 соответственно степень превращения В 0,908.

10. Определите степень превращения соды и выход продукта при получении известковым способом 10т 40% раствора NaOH:



Если для производства взято 5,75 т содового сырья, содержащего 95% Na_2CO_3 и 5% NaHCO_3 .

11. Для проведения реакции дегидратации этилового спирта
 $2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = (\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

Взято исходное количество спирта, равное 24 моль, получено 8 моль эфира. Рассчитайте состав полученной реакционной смеси, степень превращения реагента и выход продукта.

Семинар 9. Термодинамический и кинетический анализ химических процессов в технологии

1. Термодинамические расчеты химико-технологических процессов. Определение констант сложных обратимых реакций и состава реакционной смеси.
2. Использование законов химической кинетики при выборе технологического режима.
3. Способы изменения скоростей простых и сложных реакций.
4. Влияние кинетических параметров на технологические характеристики процесса.

Задачи и упражнения

1. Сформулируйте основной круг задач, решаемых в химической технологии при выборе технологического режима на основании законов химической термодинамики.

2. Выведите уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента А по величине K_c для реакции $2\text{A} \leftrightarrow \text{R}$.

3. Выведите уравнение взаимосвязи между выходом целевого продукта, степенью превращения и полной селективностью при проведении параллельных обратимых реакций

4. Найдите константу равновесия при температурах 500 и 2000 К для реакции $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$, если $\Delta G_{500} = -20,2$ кДж/моль и $\Delta G_{2000} = 25,3$ кДж/моль.

5. Используя правило составления кинетических уравнений сложных реакций, запишите кинетическое уравнение расчета ско-

ростей по веществам А, В, R и М для реакции: $A+B \leftrightarrow R+S$; $A+R \rightarrow M$ при известных k_1, k_2, k_3 .

6. Проанализируйте зависимость дифференциальной селективности от температуры для двух параллельных реакций одинакового порядка.

7. Выведите уравнение зависимости дифференциальной селективности от концентрации реагента А для параллельных реакций, имеющих разный порядок по реагенту А.

8. Пероксид водорода, начальная концентрация которого 25,4 моль/л, каталитически разлагается. Через 10 минут в растворе остается 13,4 моль/л H_2O_2 , через 20 минут – 7,08 моль/л, а через 30 минут – 3,81 моль/л. Определите порядок реакции и константу скорости. *Ответ:* 0,0635 мин⁻¹.

9. Определите энергию активации окисления SO_2 до SO_3 на ванадиевом катализаторе, если константа скорости процесса равна 6,3 с⁻¹ при 455°C, 12 с⁻¹ при 470°C и 26,2 с⁻¹ при 490°C. *Ответ:* 191,3 кДж/моль.

10. Газовая смесь синтеза аммиака состоит из азота и водорода. Найдите отношение H_2 к N_2 , при котором скорость реакции будет максимальной. Скорость реакции синтеза аммиака описывается уравнением М.И. Темкина и В.М. Пыжева - $u = k_1 p_{N_2} (p_{H_2}^3 / p_{NH_3}^2)^{0,5} - k_2 (p_{NH_3}^2 / p_{H_2}^3)^{0,5}$. *Ответ:* 3:1.

11. При протекании последовательной реакции $A \rightarrow B \rightarrow C$ определите момент, когда концентрация В достигает максимального значения, если $k_1 = 2k_2$.

12. Газовая смесь состоит из оксида азота (II) и воздуха. Найдите концентрацию кислорода, при которой оксид азота окисляется с максимальной скоростью, если процесс проводить при температуре 150 °C, когда процесс практически необратим, а скорость описывается уравнением $u = k C_{NO}^2 C_{O_2}$.

Семинар 10. Химические реакторы

1. Основные уровни химического процесса и моделирование химических реакторов.
2. Классификация химических реакторов.

3. Уравнение материального баланса по веществу с учетом молекулярного, конвективного переноса и протекания химической реакции.
4. Модель химических реакторов с идеальной структурой потока в изотермическом режиме. Реактор идеального смешения.
5. Реактор идеального вытеснения. Уравнение материального баланса при стационарном и нестационарном режиме работы.
6. Сравнение эффективности проточных реакторов идеального смешения и идеального вытеснения.
7. Каскад реакторов идеального смешения.

Задачи и упражнения.

1. Сформулируйте основные требования, предъявляемые к математической модели химического реактора. Почему уравнения материального и энергетического баланса составляют основу математической модели.

2. Каковы различия в условиях перемешивания в проточных реакторах смешения и вытеснения?

3. Каковы основные причины отклонения от идеальности в реальных реакторах смешения и вытеснения?

4. Составьте уравнение материального баланса для периодического реактора идеального смешения, покажите достоинства и недостатки.

5. Составьте и сравните уравнение материального баланса для проточного реактора идеального смешения и реактора идеального вытеснения.

6. Докажите, что модель каскада реакторов идеального смешения является промежуточной между моделями идеального вытеснения и идеального смешения.

7. Определите концентрацию реагента А на выходе из проточного реактора идеального смешения объемом $1,2 \text{ м}^3$, если для проведения реакции $A \rightarrow R + S$, кинетика которой описывается уравнением $\omega_A = 3C_A^{1,5}$, подают реагент А с начальной концентрацией $C_{A0} = 1,5 \text{ кмоль/м}^3$ и объемным расходом $3 \text{ м}^3/\text{ч}$.

8. Определите объем реактора идеального вытеснения для проведения реакции $2A \rightarrow R + S$, если константа скорости составляет $5 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{ч})$, начальная концентрация реагента А $C_{A0} = 2 \text{ кмоль/м}^3$, объемный расход $12 \text{ м}^3/\text{ч}$, необходимая степень превращения $X_A = 0,75$.

9. Уксусный ангидрид подвергают гидролизу в реакторе с мешалкой, работающем в режиме полного смешения. Концентрация уксусного ангидрида в исходной смеси 0,3 моль/л. Степень превращения 0,7. Объемный расход жидкости постоянен и составляет 20 л/мин. Процесс идет при большом избытке воды. Константа скорости гидролиза $0,38 \text{ мин}^{-1}$. Определите: 1) объем единичного реактора смешения, обеспечивающий заданную степень превращения; 2) реакционный объем, требующийся для проведения того же процесса при тех же условиях в реакторе идеального вытеснения; 3) число единичных реакторов смешения, требующихся для того, чтобы общий реакционный объем приближался к объему реактора вытеснения. *Ответ:* 123 л, 63,5 л; 8.

10. Для производства 50 т/сут. этилацетата по реакции $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{CH}_3\text{COOH} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$ запроектирован реактор с мешалкой периодического действия. Реакция протекает в жидкой фазе при температуре 100°C . Скорость описывается уравнением $r_A = k[C_A C_B - (C_D C_R / K)]$, где $k = 7,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / (\text{кмоль} \cdot \text{с})$, $K = 2,93$. Загруженный в реактор водный раствор плотностью 1020 кг/м^3 содержит 23%(масс.) кислоты и 46%(масс.) этанола и не содержит этилацетата. Плотность реакционной смеси остается неизменной на протяжении всего процесса. Заданная степень превращения кислоты 35%. Время загрузки и разгрузки реактора 1ч.

Затем производство перевели на непрерывное, сохраняя тот же состав исходной смеси и ту же степень превращения. Рассчитайте: 1) объем реактора при периодическом производстве; 2) какова производительность, если он будет работать непрерывно; 3) какой объем реакционной зоны необходим, если реакция проводится непрерывно в трехступенчатом реакторе смешения. *Ответ:* 52 м^3 ; 47 м^3 ; 14 м^3 ; 42 м^3 .

11. Определите число секций каскада реакторов идеального смешения равного объема $V = 0,5 \text{ м}^3$, необходимых для достижения степени превращения $X_A = 0,65$ при поведении реакции

$A + 2B \rightarrow R + 2S$, кинетика которой описывается уравнением :

$r_A = k C_A^{0,5} C_B^{1,5}$, если $k = 2,5 \text{ м}^3 / (\text{кмоль} \cdot \text{ч})$, $C_{A0} = 1 \text{ кмоль/м}^3$, $C_{B0} = 2 \text{ кмоль/м}^3$, при объемном расходе $10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Темы реферативных работ

Для более полного и углубленного знакомства с некоторыми химическими производствами предлагается написание и защита реферативных работ. Оформляется реферат в соответствии с требованиями, предъявляемыми к курсовым работам в Томском государственном университете. В нем должны быть отражены следующие вопросы:

– Во **введении** должны быть показаны области применения продукта, его технические характеристики, условия хранения и транспортировки, экологическая безопасность. Дается характеристика сырьевой базы и оценка расходных коэффициентов и эффективности использования различных видов сырья.

– В главе **«Физико-химические основы процесса производства»** приводится анализ химических и технологических концепций возможных или известных способов производства данного продукта. Наиболее подробно рассматривается физико-химическая основа одного способа производства.

– В главе **«Технологическое оформление процесса»** приводится и анализируется технологическая схема производства, раскрывается движение массовых и тепловых потоков, применение гидравлических, массообменных и теплообменных процессов при подготовке исходных веществ и очистке целевого продукта. Приводятся принципиальные технологические схемы и аппаратное оформление. Описывается схема и принцип работы основного аппарата химического производства – реактора.

– В главе **«Охрана окружающей среды»** приводятся и анализируются все возможные виды загрязнения воздушного и водного бассейнов при рассматриваемом производстве и утилизации отходов.

Перечень тем рефератов

Вода в химической промышленности. Очистка воды.

Технология связанного азота:

1. Производство азотной кислоты
2. Производство азотсодержащих солей
3. Производство аммиака

Переработка фосфорсодержащего сырья:

1. Электротермический способ получения элементарного фосфора

2. Производство фосфорных кислот
3. Производство фосфорных удобрений

Электрохимические производства:

1. Производство соляной кислоты
2. Производство хлора и щелочи
3. Производство содовых продуктов.

Технология силикатов и вяжущих веществ:

1. Производство стекла
2. Производство керамики
3. Производство фарфора
4. Производство функциональной керамики (сверхпроводящая, био- керамика)

Черная и цветная металлургия:

1. Производство чугуна
2. Производство стали
3. Производство алюминия
4. Производство меди, цинка, олова
5. Производство золота и серебра
6. Производство урана
7. Производство платиновых металлов
8. Производство тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, титан)

Переработка углеродсодержащего природного сырья:

1. Коксование каменных углей, переработка коксовых газов
2. Газификация твердого топлива
3. Пиролиз древесины
4. Каталитический крекинг нефти
5. Производство жидких топлив и масел

Технология основного органического синтеза:

1. Производство метанола
2. Производство формальдегида
3. Производство этилового спирта
4. Производство уксусной кислоты
5. Производство ацетона
6. Производство фенола
7. Производство анилина
8. Производство древесной целлюлозы

Производство высокомолекулярных соединений:

1. Производство искусственных волокон
2. Производство полиэтилена

3. Производство полипропилена
4. Производство фенолформальдегидных смол
5. Производство резины
6. Производство ионообменных смол
7. Производство каучуков

Список обязательной литературы

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учеб. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов, В.В. Захаренко, Т.В. Зиновкина, А.Л. Таран, А.Е. Костанян. М. : Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006, Кн. 2. 872 с.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учеб. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов, В.В. Захаренко, Т.В. Зиновкина, А.Л. Таран, А.Е. Костанян. М. : Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006, Кн. 1. 912 с.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 793 с.
4. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. М.: Химия, 1977. 592 с.
5. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1995. Т. 1. 400 с.
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1995. Т. 2. 368 с.
7. Павлов К.Ф., Романков П.Г. и др. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии Л.: Химия, 1987. 576 с.
8. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технологи. М.: Высшая школа, 1990. 520 с.
9. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технологи. М.: ИКЦ «АКАДЕМКНИГА», 2007. 528 с.
10. Кузнецова И.М., Харлампида Х.Э., Батыршин Н.Н. Общая химическая технология: материальный баланс химико-технологических процессов: учебное пособие для вузов. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. 264 с.
11. Ахметов Т.Г., Порфирьева Р.Т., Гайсин Л.Г., Ахметова Л.Т., Каримов Я.М., Хапринов А.И. Химическая технология

- неорганических веществ. М.: Высшая школа. 2002. Кн. 1. 88 С.
12. Ахметов Т.Г., Порфирьева Р.Т., Гайсин Л.Г., Ахметова Л.Т., Каримов Я.М., Хапринов А.И. Химическая технология неорганических веществ. М.: Высшая школа. 2002. Кн. 2. 533 с.
 13. Соколов Р.С. Химическая технология. М.: Владос, 2000. Т. 1. 366 с.
 14. Соколов Р.С. Химическая технология. – М. : Владос, 2000. Т. 2. 447 с.
 15. Лабораторный практикум по общей химической технологии: учеб. пособие / под ред. проф. В.С. Бескова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 279 с.
 16. Пауль А.П. А, Б, В ... химической кинетики. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 277 с.

Список дополнительной литературы

1. Карапетьянц М.Х. Введение в теорию химических процессов. М.: Высшая школа, 1981. 320 с.
2. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных производств. М.: Химия. 1982. 288 с.
3. Флореа О., Смигельский О.Т. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. М.: Химия, 1971. 324 с.
4. Пранская О.С. Сборник задач и упражнений по химической технологии. Минск: Университет, 1989. 311 с.
5. Расчеты химико-технологических процессов / под ред. И.П. Мухленова. Л.: Химия, 1982. 412 с.
6. Ключников Н.Г. Практические занятия по химической технологии. М.: Просвещение, 1978. 380 с.
7. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987. 493 с.
8. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981. Т. 1. 384 с.
9. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981. Т. 2. 810 с.
10. Основы проектирования химических производств: учебник для вузов / под ред. А.И Михайличенко. М.: ИКЦ « Академкнига», 2005. 332 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ	
«ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»	5
Общие вопросы химической технологии	7
Теоретические основы химической технологии	8
Важнейшие группы химических производств.....	10
КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН	
лекций, лабораторных работ, семинарских и практических занятий по курсу «Химическая технология»	12
Планы семинарских занятий	
по курсу «Химическая технология»	15
Темы реферативных работ	35
Список обязательной литературы	37
Список дополнительной литературы	38

Корректор – А.Н. Воробьева

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 449 от «27» июня 2014 г. Тираж 100 экз.