

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ ХИМИИ**  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИХ ДВО РАН)

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИХ ДВО РАН

\_\_\_\_\_ академик В.И. Сергиенко  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

**ПРОГРАММА КУРСА**

**«ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ»**

Для аспирантов, проходящих обучение по направлению подготовки  
**04.06.01 - Химические науки**

**Направленность** (профиль) подготовки 02.00.04 физическая

**Квалификация** (степень) выпускника: **Исследователь. Преподаватель-исследователь**  
Форма обучения **очная**

Владивосток 2015 г.

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА

Целью курса "Процессы и аппараты химической технологии» является формирование у аспирантов систематизированного представления об основах общей химической технологии, химических процессах и аппаратах, синтеза общенаучной и общинженерной подготовки, что необходимо для дальнейшей научно-исследовательской, проектной и практической работы.

### В задачи курса входит:

- изучение основ гидромеханики, тепло- и массообмена;
- изучение теории и практики базовых процессов с акцентом на основные закономерности и общие принципы анализа, моделирования, расчета и оптимизации этих процессов, их эффективное энергообеспечение и аппаратурное оформление;
- развитие понимания физической сущности и общности процессов химической технологии.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ УСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КУРСА

Аспиранты, завершившие изучение данной дисциплины, **должны:**

### **-ЗНАТЬ:**

- основы теории переноса импульса, тепла и массы; принципы физического моделирования процессов; основные уравнения движения жидкостей; основы теории теплопередачи; основы теории массопередачи в системах со свободной и неподвижной границей раздела фаз; типовые процессы химической технологии, соответствующие аппараты и методы их расчета;
- методы построения эмпирических и теоретических моделей химико-технологических процессов.

### **УМЕТЬ:**

- определять характер движения жидкостей и газов; основные характеристики процессов тепло- и массопередачи; рассчитывать параметры и выбирать аппаратуру для конкретного технологического процесса;
- рассчитывать основные характеристики химико- технологического процесса, выбирать рациональную схему.

### **ВЛАДЕТЬ:**

- методами технологических расчетов отдельных узлов и деталей химического оборудования;
- навыками проектирования типовых аппаратов химической промышленности;
- методами определения оптимальных и рациональных технологических режимов работы оборудования.

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ.

Вид учебной работы	Часов
Общая трудоемкость дисциплины	<b>72</b>
Лекции	18
Практические занятия (ПЗ)	18

Самостоятельная работа:	/36
Вид итогового контроля: (зачет с оценкой)	

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ. 4.1 РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ ЗАНЯТИЙ

№ п/п	Раздел дисциплины	Количество часов			
		Всего	Лекции	Практические (семинарские) занятия	Самостоятельная работа
	<b>Введение. Основные закономерности процессов и общие принципы расчета аппаратов химической технологии.</b>	3	1	1	2
1.	<b>Гидродинамические процессы и аппараты химической технологии.</b>				
1.1	Жидкости и газы. Дифференциальная и интегральная форма уравнения неразрывности. Уравнение Навье-Стокса	2	1	1	2
1.2	Гидростатика. Дифференциальные уравнения равновесия Эйлера	1	1	1	2
1.3	Гидродинамика. Уравнения движения Эйлера. Энергетический баланс стационарного движения. Уравнение Бернулли.	4	1	1	2
1.4	Течение в трубах и каналах. Гидродинамическое сопротивление.	2	2	2	4
1.5	Перемещение жидкостей и газов с помощью машин, повышающих давление.	4	2	2	4
2	<b>Тепловые процессы и аппараты химической технологии.</b>				
2.1	Основные тепловые процессы в химической технологии. Тепловые балансы.	8	2	2	4

2.2	Дифференциальное уравнение переноса энергии в форме теплоты. Теплопроводность.	2	1	1	2
2.3	Конвективный перенос теплоты. Теплообмен при изменении агрегатного состояния.	4	1	1	2
2.4	Теплопередача в поверхностных теплообменниках. Расчет теплообменных аппаратов.	8	1	1	2
<b>3</b>	<b>Процессы и аппараты разделения гомогенных и гетерогенных систем. (Основные массообменные и гидромеханические процессы)</b>				
3.1	Основы массообменных процессов. Способы выражения состава фаз. Равновесные условия.	6	1	1	2
3.2	Массопередача. Массообмен в аппаратах химических производств.	2	1	1	2
3.3	Расчет основных размеров массообменных аппаратов с непрерывным и ступенчатым контактом фаз. Абсорбция.	6	1	1	2
3.4	Расчет основных размеров дистилляционных колонн с непрерывным и ступенчатым контактом фаз.	1	1	1	2
3.5	Разделение жидких и газовых гетерогенных систем.	4	1	1	2
Итого		<b>72</b>	18	18	36

## 4.2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

### Темы и краткое содержание

#### **Введение. Основные закономерности процессов и общие принципы расчета аппаратов химической технологии**

Предмет курса «Процессы и аппараты химической технологии». Классификация процессов. Непрерывные и периодические, стационарные и нестационарные процессы. Основы теории явлений переноса: анализ механизмов, моделирования и разработки обобщенных методов расчета гидромеханических, тепловых и массообменных процессов и аппаратов. Феноменологические законы переноса импульса, массы и энергии. Молекулярный и конвективный перенос. Общие закономерности гидродинамики, теплопередачи и массопередачи. Взаимосвязь этих процессов в промышленной аппаратуре. Роль явлений переноса при химических превращениях. Материальные и энергетические (тепловые) балансы; определение массовых потоков и энергетических затрат. Условия равновесия и определение направления процессов переноса. Общий вид уравнений скорости процессов; движущие силы и кинетические коэффициенты. Лимитирующие стадии.

#### **Раздел 1. Гидродинамические процессы и аппараты химической технологии.**

**Тема 1.1** Жидкости и газы. Модель непрерывной среды. Понятие физического элементарного объема. Классификация жидкостей. Идеальная жидкость. Капельные и упругие жидкости. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные. Напряжения в жидкостях и газах (тангенциальные и нормальные). Свойства жидкостей. Понятие о режимах движения жидкостей. Дифференциальная и интегральная форма уравнения неразрывности.

Баланс сил при движении вязкой несжимаемой жидкости. Уравнение Навье-Стокса и его физический смысл.

**Тема 1.2** Гидростатика. Дифференциальные уравнения равновесия Эйлера. Покоящаяся жидкость под действием силы тяжести. Практические приложения основного уравнения гидростатики.

**Тема 1.3** Гидродинамика. Уравнение движения Эйлера. Энергетический баланс стационарного движения идеальной жидкости. Уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкости. Его практические приложения (истечение жидкостей, трубка Пито-Прандтля). Принципы измерения скоростей и расходов жидкости дроссельными приборами и пневмометрическими трубками. Определение расходов при истечении жидкостей через отверстия или насадки.

Гидродинамические режимы движения жидкостей: ламинарный и турбулентный.

Число Рейнольдса и его критические значения. Механизмы ламинарного и турбулентного течений. Понятие турбулентности. Представления о гидродинамическом пограничном слое при течении по трубам и каналам и при обтекании тел.

**Тема 1.4** Течение в трубах и каналах. Определяющий поперечный размер потока в каналах произвольной формы: гидравлический радиус, эквивалентный диаметр.

Распределение скоростей по радиусу трубы постоянного сечения при ламинарном стационарном течении.

Гидравлическое сопротивление при течении жидкостей и газов. Расчет потерь на трение (уравнение Дарси-Вейсбаха) и на местные сопротивления. Соотношения и номограммы для расчета коэффициента трения. Зависимости между расходом и перепадом давления. Расчет напора для перемещения жидкостей через систему трубопроводов и аппаратов.

Подобное преобразование уравнения Навье-Стокса. Безразмерные переменные - критерии гидродинамического подобия (Эйлера, Рейнольдса, Фруда, гомохронности), их физический смысл; параметрические критерии.

Расчет диаметра трубопроводов и аппаратов; выбор скоростей потоков и оптимального диаметра трубопроводов.

**Тема 1.5** Перемещение жидкостей и газов с помощью машин, повышающих давление. Объемные (поршневые, ротационные и др.) и динамические (центробежные, осевые и др.) насосы и компрессоры. Основные параметры работы гидравлических машин: производительность, напор, мощность, КПД.

Расчет напора и потребляемой мощности; подбор двигателя к насосу. Определение допустимой высоты всасывания. Явление кавитации и его предотвращение.

Особенности работы, сопоставление и области применения основных типов насосов - центробежных, поршневых (плунжерных) и др. Связь напора, мощности и к.п.д. с производительностью (характеристики насосов). Работа насосов на сеть и их выбор; регулирование производительности.

## **Раздел 2. Тепловые процессы и аппараты химической технологии.**

**Тема 2.1** Основные тепловые процессы в химической технологии: нагревание и охлаждение, конденсация паров и испарение жидкостей. Расход теплоносителей; тепловой баланс как частный случай энергетического баланса.

Стационарный и нестационарный перенос теплоты. Основные понятия и определения: температурное поле, градиент температуры и тепловой поток; теплопередача и теплоотдача.

**Тема 2.2.** Дифференциальное уравнение переноса энергии в форме теплоты, уравнение Фурье-Кирхгофа и теплопроводности.

Температуропроводность – теплоинерционные свойства среды. Стационарный перенос теплоты через плоские и цилиндрические стенки. Сочетание механизмов переноса теплоты (теплопроводности, конвекции, излучения).

**Тема 2.3.** Конвективный перенос теплоты. Безразмерные переменные – числа Нуссельта, Пекле, Прандтля, Грасгофа, Фурье. Расчет коэффициентов теплоотдачи при вынужденной и естественной конвекции.

Теплообмен при изменении агрегатного состояния. Конденсация паров. Формула Нуссельта. Теплообмен при кипении.

Радиантный теплоперенос. Взаимное излучение тел. Радиантно-конвективный перенос теплоты. Расчет потерь теплоты аппаратами в окружающую среду и тепловой изоляции.

**Тема 2.4.** Теплопередача в поверхностных теплообменниках. Аддитивность термических сопротивлений. Понятие средней движущей силы. Взаимное направление движения теплоносителей.

Способы подвода и отвода теплоты в химической технологии. Требования, предъявляемые к теплоносителям. Обогрев водяным паром, высокотемпературными органическими теплоносителями, топочными газами. Способы электрообогрева. Отвод теплоты водой, воздухом и низкотемпературными теплоносителями.

Теплообменные аппараты; их классификация. Основные типы поверхностных теплообменников (трубчатые, пластинчатые и т.д.) Смесительные теплообменники: градирни, конденсаторы смешения. Основные тенденции совершенствования теплообменных аппаратов.

Основные элементы расчета размеров теплообменных аппаратов. Выбор теплообменников.

## **Раздел 3. Процессы и аппараты разделения гомогенных и гетерогенных систем (Основные массообменные и гидромеханические процессы)**

**Тема 3.1** Основы массообменных процессов.

Классификация процессов массообмена. Основные понятия и определения. Процессы со свободной и фиксированной границей раздела фаз и с разделяющей фазы перегородкой (мембраной). Носители и распределяемые вещества. Способы выражения состава фаз.

Физико-химические основы массообменных процессов. Равновесные условия и определение направления переноса вещества из фазы в фазу. Коэффициенты распределения. Понятие о массопередаче и массоотдаче.

Концентрационное поле, градиент концентрации, общий и удельный поток массы. Молекулярная диффузия в жидкостях, газах (парах) и твердых телах.

Механизмы переноса массы. Уравнение неразрывности для двухкомпонентной системы.

Дифференциальное уравнение конвективного переноса массы в бинарных средах. Диффузионный пограничный слой; профили концентраций и скоростей в потоках.

Коэффициенты массоотдачи. Основные модельные представления о механизме массоотдачи.

Моделирование конвективного массообмена. Числа Нуссельта, Пекле, Прандтля, Фурье и др., их физический смысл, аналогии с тепловым подобием применительно к газам и жидкостям. Расчет коэффициентов массоотдачи в аппаратах различных типов по уравнениям с безразмерными переменными.

**Тема 3.2** Массопередача. Соотношение между коэффициентами массопередачи и массоотдачи, аддитивность диффузионных сопротивлений. Интенсификация массопередачи путем воздействия на лимитирующую стадию.

Моделирование и расчет массообменных процессов и аппаратов для систем с одним распределяемым компонентом.

Влияние условий (температуры, давления, концентраций) на направление массопереноса на примерах абсорбции; принципы выбора абсорбентов.

Материальный баланс непрерывного установившегося процесса при различных способах выражения составов фаз и их расходов; уравнения рабочих линий.

Рациональный выбор взаимного направления движения фаз и организации потоков в массообменных аппаратах. Аппараты с непрерывным и ступенчатым контактом фаз.

Предельные концентрации распределяемого компонента в отдающей и извлекающей фазах для противоточных процессов. Максимально возможная степень извлечения, минимальный и оптимальный расходы извлекающей фазы.

**Тема 3.3** Расчет поперечного сечения (диаметра) колонны; предельно допустимая и экономически оптимальная скорости сплошной фазы.

Основы расчета высоты массообменных аппаратов с непрерывным и ступенчатым контактом фаз. Два основных метода расчета: на основе коэффициентов массопередачи и на основе понятия теоретической ступени разделения. Расчет высоты колонных аппаратов с непрерывным контактом фаз на основе коэффициентов массопередачи с использованием модели идеального вытеснения в обеих фазах. Случаи малых и больших концентраций в изотермических условиях. Понятие числа единиц переноса и высоты единицы переноса. Фактор массопередачи. Влияние продольного перемешивания на среднюю движущую силу массопередачи. Процедура расчета, основанная на объемных коэффициентах массопередачи. Графический и аналитический методы расчета.

Расчет высоты массообменных аппаратов со ступенчатым контактом фаз. Модель идеального смешения в обеих фазах в пределах одной ступени. Эффективность ступени по Мэрффри. Модель идеального вытеснения в газовой (паровой) фазе и идеального смешения в жидкой. Связь числа единиц переноса и локального КПД ступени по Мэрффри. Численный расчет «от ступени к ступени» и его графическая интерпретация с использованием «кинетической линии». Учет структуры потоков и КПД тарелки. Особенности расчета тарельчатых колонн на основе понятия теоретической тарелки. Число действительных и теоретических тарелок. Эффективность тарелки.

Основные методы интенсификации массообмена в системах со свободной границей раздела фаз: создание оптимальных гидродинамических режимов и повышение интенсивности массопередачи, увеличение удельной поверхности контакта фаз, снижение продольного перемешивания в потоках фаз.

Общие принципы устройства и классификация аппаратов для массообменных процессов в системах "газ(пар)-жидкость". Особенности конструкций абсорберов.

Основные типы абсорберов: насадочные и тарельчатые колонны, аппараты со сплошным и секционированным барботажным слоем, аппараты с диспергированием жидкости.

Области применения, сравнительные характеристики и выбор аппаратов различных конструкций. Основные тенденции их совершенствования.

Схемы абсорбционно-десорбционных установок с выделением извлеченного компонента и регенерацией абсорбента (десорбцией при повышенной температуре, понижением давления, отдувкой инертным носителем).

#### **Тема 3.4. Основы расчета и аппараты для дистилляции**

Разделение дистилляцией жидких гомогенных смесей и сжиженных газов; области применения и особенности проведения процессов при различном давлении.

Парожидкостное равновесие для систем с полной и ограниченной взаимной растворимостью и его влияние на возможность разделения компонентов дистилляционными методами. Расчет равновесия для идеальных бинарных смесей.

Простая и фракционная перегонка; перегонка с дефлегмацией. Материальный баланс, расчет выхода продукта и его среднего состава при перегонке бинарных смесей. Схемы установок. Тепловые балансы и расчет расходов теплоносителей для этих процессов.

Ректификация. Физико-химические основы и особенности условий проведения процессов. Схемы установок для непрерывной и периодической ректификации бинарных смесей. Особенности устройства аппаратов (насадочных и тарельчатых колонн) и выбора режимов их работы при ректификации (по сравнению с абсорбцией). Особенности устройства и варианты работы испарителей и дефлегматоров.

Моделирование и расчет процессов и аппаратов при непрерывной ректификации бинарных систем. Основы численного и графоаналитического методов. Материальный баланс. Рабочие линии. Определение минимального и рабочего флегмового числа. Тепловой баланс и расчет расходов теплоносителей. Принципы технико-экономической оптимизации при расчете рабочего флегмового числа, размеров аппаратуры и энергетических затрат. Основы расчета тарельчатых и насадочных ректификационных колонн.

#### **Тема 3.5 Разделение жидких и газовых гетерогенных систем.**

Классификация жидких и газовых гетерогенных систем: суспензии, эмульсии, пены, пыли, туманы.

Основы теории осаждения. Расчет скоростей свободного и стесненного осаждения твердых частиц шарообразной и отличных от нее форм в поле силы тяжести.

Материальный баланс процессов разделения гетерогенных систем. Оценка эффективности, сопоставление и преимущественные области применения различных процессов и аппаратов для разделения гетерогенных смесей.

Процессы отстаивания и устройство аппаратов разделения суспензий, эмульсий и пылей. Расчет поверхности осаждения и производительности отстойников. Устройство и действие циклонов (простых и батарейных), гидроциклонов.

Течение через неподвижные зернистые слои. Значение гидродинамики зернистых слоев в процессах фильтрования, тепло- и массообмена, гетерогенного катализа и др. Основные характеристики этих слоев: дисперсность, удельная поверхность, порозность, эквивалентный диаметр каналов. Расчет гидравлического сопротивления слоя.

Гидравлическое сопротивление слоев насадок промышленных массо- и теплообменных аппаратов.

Режимы течения потоков в насадочных колоннах. Гидравлическое сопротивление насадочных колонн. Явления подвисания, захлебывания и инверсии фаз и расчет соответствующих скоростей. Работа колонн в режиме эмульгирования.

Гидродинамика псевдооживленных (кипящих) слоев. Роль псевдооживления в интенсификации промышленных процессов теплообмена, сушки, адсорбции, гетерогенного катализа, обжига и др. Основные характеристики псевдооживленного состояния. Гидравлическое сопротивление. Расчет скоростей псевдооживления и свободного витания, высоты псевдооживленного слоя. Однородное и неоднородное псевдооживление. Особенности псевдооживления полидисперсных слоев. Пневмо- и гидротранспорт зернистых твердых материалов.

Фильтрация суспензий и очистка газов от пылей на фильтрах. Специфика поведения осадков как зернистых слоев: сжимаемые и несжимаемые осадки. Виды фильтровальных перегородок. Факторы, влияющие на скорость фильтрации. Фильтрация при постоянной скорости фильтрации. Экспериментальное определение констант уравнений фильтрации. Классификация и устройство основных типов непрерывно и периодически работающих фильтров и фильтрующих центрифуг.

Другие процессы разделения гомогенных смесей: экстракция в системе жидкость-жидкость, адсорбция, сушка, мембранные процессы. Преимущественные области применения. Краткое описание типичных аппаратов.

### **Основная литература**

1. Касаткин А.Г. - Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд. М.: Химия, 1973. - 750 с.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В 2 ч. / Ю.И. Дытнерский. - 3-е изд. - М.: Химия, 2002 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи):- СПб.: Химиздат, 2009. -544 с.
4. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. - Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688с.

### **Дополнительная литература**

1. Юдаков А.А., Цыбульская О.Н., Добржанский В.Г.-Интенсификация тепломассопереноса при обработке дисперсных материалов в вихревом потоке. В кн.: Теплоэнергетика и энергосбережение - Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2011.-257 с.
2. Юдаков А.А., Балабин Д.Н., Цыбульская О.Н. Теплопередача (учебное пособие Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. 274 с.
3. Юдаков А.А., Цыбульская О.Н., Авраменко В.А. Тепломассообмен в закрученном газодисперсном потоке при противоточном движении компонентов. Труды 5 Минского Международного Форума по тепломассообмену., ГНУ «ИТМО НАНБ», Минск, 2004.
4. Юдаков А.А. Закрученные газодисперсные потоки в химико-технологических аппаратах. Владивосток: Дальнаука, 2000.- 278 с.

Программу разработал

д.т.н.

А.А. Юдаков