

# **Программа кандидатского экзамена по научной специальности**

## **05.17.08 Процессы и аппараты химических технологий**

### **СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

#### **1. Системный анализ процессов химической технологии**

Основные принципы системного анализа; взаимосвязь явлений в отдельных процессах и аппаратах; иерархия явлений и их соподчиненность в изучении процессов и аппаратов; иерархическая структура химического производства; взаимовлияние аппаратов. Математическое моделирование как современный метод анализа и синтеза химико-технологических процессов и химико-технологических систем. Сущность и цели математического моделирования объектов химической технологии, формы представления информации о процессе (алгебраические уравнения, дифференциальные уравнения, интегральные уравнения, конечно-разностные уравнения). Постановка задачи математического описания процесса. Два подхода к составлению математической модели процесса: детерминированный и стохастический. Их возможности и сферы использования. Теория подобия и анализ размерностей. Подобные преобразования, физическое моделирование. Основы теории переноса количества движения, энергии, массы; гидродинамика и гидродинамические процессы: основные уравнения движения жидкостей, гидродинамическая структура потоков, сжатие и перемещение газов, разделения неоднородных жидких и газовых систем, перемешивание в жидких средах.

#### **2. Типовые модели структуры потоков в аппаратах непрерывного действия**

Модель идеального смешения. Вывод дифференциального уравнения модели. Вид функции отклика модели на стандартные возмущения. Частотные характеристики модели. Условия реализуемости принятых допущений в приложении к аппаратам химической технологии. Модель

идеального вытеснения. Вывод дифференциального уравнения модели. Передаточная функция. Вид функции отклика и частотные характеристики модели. Сравнительная оценка идеальных моделей. Энтропийная оценка меры упорядоченности движения частиц. Учет рассеяния по времени пребывания. Ячеечная модель. Частотные характеристики и вид функции отклика. Вывод уравнения предельного перехода к модели идеального вытеснения. Диффузионная модель. Комбинированные (многопараметрические) модели. Байпасирование. Последовательное и параллельное включение ячеек идеального смешения и вытеснения. Модель с застойной зоной.

### **3. Течение жидкости в пленках, трубах, струях и пограничных слоях**

Уравнения и граничные условия гидродинамики. Течение, вызванное вращением диска. Гидродинамика тонких стекающих пленок. Струйные течения. Ламинарное течение в трубах различной формы. Продольное обтекание плоской пластины. Пограничный слой. Движение частиц, капель, пузырей в жидкости. Общее решение уравнений Стокса в осесимметричном случае. Обтекание сферической частицы, капли и пузыря поступательным стоксовым потоком. Обтекание сферической частицы, капли и пузыря сдвиговым потоком. Обтекание несферических твердых частиц. Стесненное движение частиц.

### **4. Массо - и теплоперенос в пленках жидкости, трубах и плоских каналах**

Уравнение и граничные условия теории конвективного тепло - и массопереноса. Теплоперенос к плоской пластине. Массоперенос в пленках жидкости. Тепло - и массоперенос при ламинарном течении в круглой трубе. Предельные числа Нуссельта при ламинарном течении жидкостей по трубам различной формы. Массо - и теплообмен частиц, капель и пузырей с

потоком. Массо - и теплообмен частиц различной формы с неподвижной средой. Массоперенос в поступательном потоке при малых числах Пекле. Массоперенос в линейном сдвиговом потоке при малых числах Пекле. Массообмен частиц и капель с потоком при больших числах Пекле (теория **диффузионного** пограничного слоя). Диффузия к сферической частице, капле и пузырю в поступательном потоке при различных числах Пекле и Рейнольдса. Диффузия к сферической частице, капле и пузырю в линейном сдвиговом потоке при малых числах Рейнольдса и любых числах Пекле.

## **5. Массообмен, осложненный поверхностной или объемной химической реакцией**

Массоперенос, осложненный поверхностной химической реакцией.

Диффузия к плоской пластине при протекании объемной реакции. Внешние задачи массообмена частиц, капель и пузырей с потоком при различных числах Пекле и наличии объемной химической реакции. Внутренние задачи массопереноса при наличии объемной химической реакции. Нестационарный массообмен с объемной реакцией. Гидродинамика, массо - и теплообмен в неньютоновских жидкостях. Реологические модели неньютоновских несжимаемых жидкостей. Движение пленок неньютоновских жидкостей. Движение неньютоновских жидкостей по трубам и каналам. Теплоперенос в плоском канале и круглой трубе (с учетом диссипации).

## **6. Элементы механики твердых дисперсных сред в процессах химической технологии**

Структура и структурные связи твердых дисперсных сред. Понятие форм и размеров твердых частиц, гранулометрического состава, сыпучести, сил взаимодействия между частицами. Реологические свойства **сыпучих материалов**, контактные силы внешнего трения и адгезионные свойства сыпучих материалов. Движение оживленных твердых дисперсных систем.

Псевдооживленные слои. Процессы тепло - и массопереноса в псевдооживленных слоях. Механические процессы. Процессы измельчения и измельчающие машины. Классификация процессов и машин. Типы дробилок (щековые, конусные, валковые, молотковые и роторные). Типы мельниц (барабанные – центробежные и вибрационные, ударного действия и др.). Смесители сыпучих материалов, кинетика процессов смешивания.

## **7. Тепловые процессы**

Основные уравнения процессов. Классификация используемых аппаратов. Теплообменники с передачей тепла через стенку. Кипятильники. Основные переменные процесса. Объекты с сосредоточенными и распределенными параметрами. Примеры. Теплообменники смешивания. Теплообменники с идеальной изоляцией, теплообменники с потерями тепла через стенку. Математические модели кожухотрубных теплообменников. Выпарные аппараты. Основные уравнения. Математическая модель однокорпусной и трехкорпусной установки. Теплообмен излучением. Законы теплового излучения. Теплообмен излучением между поверхностями твердых тел, между газом и твердой поверхностью.

## **8. Диффузионные процессы**

Математическое описание равновесия в многокомпонентных системах. Термодинамика равновесных и неравновесных состояний. Математическое описание процессов диффузии. Однофазная неподвижная среда. Стационарная диффузия в движущихся средах. Диффузия в многокомпонентных системах. Диффузионный потенциал. Массопередача в диффузионных процессах. Модели массопередачи. Пленочные и распылительные колонны. Математические модели аппаратов с поверхностью контакта, образующейся в процессе движения потоков. Модели тарельчатых колонн. Модели насадочных колонн. Деформация математических моделей при изменении гидродинамических режимов.

Математическая модель эмульгационных колонн. Модели пульсационных колонн. Модели ротационных аппаратов.

### **9. Математические модели сушильных установок**

Кинетика сушки. Контактные сушилки. Сушилки со стационарным слоем. Сушилки с псевдооживленным и движущимся слоем. Особенности математического описания сушилок.

### **10. Математические модели кристаллизационных установок**

Описание роста кристаллов и зародышеобразования. Типы используемых кристаллизаторов. Математические модели кристаллизаторов различного типа.

### **11. Математические модели процессов разделения**

Равновесие и массопередача в системах жидкость–жидкость. Типы используемых экстракционных аппаратов. Математические модели колонных экстракторов. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Описание равновесия в системах жидкость–пар, жидкость–газ. Типы ректификационных и абсорбционных аппаратов, их математическое описание. Математические модели мембранных установок. Общая характеристика мембранных способов разделения смесей. Их классификация. Виды мембран. Описание процесса переноса в мембранах. Математические модели фильтрационных установок, установок обратного осмоса, первапорационных установок.

### **12. Гомогенные химические реакторы**

Гомогенные изотермические реакторы. Классификация реакторов по гидродинамическому признаку. Реактор периодического действия. Проточный реактор с мешалкой. Каскад реакторов идеального смешения. Оптимальное соотношение объемов реакторов в каскаде. Реактор с продольным перемешиванием потока (ламинарный и турбулентный

режимы). Выбор типа реактора с учетом селективности реакции. Микро - и макросмешение в реакторах. Расчет реактора при произвольном распределении времени пребывания реагирующей смеси. Комбинированные модели реакторов. Примеры построения математических моделей и расчет некоторых типов промышленных реакторов. Фотохимические реакторы. Гомогенные неизотермические реакторы. Классификация реакторов по энергетическому признаку. Адиабатические и политропические реакторы. Сравнение эффективности адиабатических и изотермических реакторов. Адиабатические и политропические реакторы с продольным перемешиванием. Комбинированные модели неизотермических реакторов. Автотермические реакторы. Устойчивость работы адиабатических и политропических реакторов. Взаимосвязь устойчивости и селективности. Примеры построения математических моделей и расчета некоторых типов промышленных неизотермических реакторов.

### **13. Гетерогенные химические реакторы**

Гетерогенные каталитические реакторы, классификация каталитических реакторов по конструктивному и гидродинамическим признакам. Одно - и многослойные реакторы со стационарным слоем катализатора. Квазигомогенная и гетерогенная модели. Горячие точки в реакторе со стационарным слоем катализатора. Оптимизация многослойных каталитических реакторов с промежуточным вводом холодной реагирующей смеси. Определение продольного и радиального перемешивания в адиабатических реакторах со стационарным слоем катализатора. Учет падения активности катализатора и изменение селективности. Устойчивость реактора со стационарным слоем катализатора и выбор диаметра трубок. Автотермические каталитические реакторы. Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора. Двухфазная и трехфазная модели реактора. Реакторы с движущимся слоем катализатора. Учет изменения активности катализатора в реакторах с псевдооживленным и движущимся слоем катализатора. Понятие о

многофазных каталитических реакторах. Примеры построения математических моделей расчета некоторых типов промышленных каталитических реакторов. Газожидкостные и жидкость-жидкостные реакторы. Классификация по конструктивному и гидродинамическим признакам. Реактор с мешалкой. Тарельчатые и насадочные реакторы. Модель идеального вытеснения в газовой и жидкой фазах. Симметричные и асимметричные ячеечные модели с образованием твердой фазы. Особенности составления математической модели многофазного реактора. Примеры составления математических моделей и расчета некоторых типов газожидкостных реакторов. Реакторы для проведения процессов в системах газ – твердое тело. Классификация промышленных реакторов по конструктивному и гидродинамическому признакам. Модели реакторов с твердой фазой.

**Вопросы для кандидатского экзамена по научной специальности  
05.17.08 Процессы и аппараты химических технологий**

1. Основные принципы системного анализа; взаимосвязь явлений в отдельных процессах и аппаратах; иерархия явлений и их соподчиненность в изучении процессов и аппаратов; иерархическая структура химического производства; взаимовлияние аппаратов.
2. Математическое моделирование как современный метод анализа и синтеза химико-технологических процессов и химико-технологических систем.
3. Сущность и цели математического моделирования объектов химической технологии, формы представления информации о процессе (алгебраические уравнения, дифференциальные уравнения, интегральные уравнения, конечно-разностные уравнения).
4. Теория подобия и анализ размерностей. Подобные преобразования, физическое моделирование.

5. Модель сплошной среды. Основные гидродинамические величины. Уравнение неразрывности. Уравнения Эйлера и Навье-Стокса.
6. Типовые модели структуры потоков в аппаратах непрерывного действия. Явление продольного перемешивания.
7. Модели идеального смешения и идеального вытеснения.
8. Ячеечная модель структуры потока. Оценка параметра.
9. Диффузионная модель структуры потока в аппаратах. Оценка параметра модели.
10. Комбинированные (многопараметрические) модели структуры потоков.
11. Внешняя задача гидродинамики. Обтекание твердых тел. неподвижные зернистые слои.
12. Гидродинамика псевдооживленных слоев.
13. Состояние системы. Уравнения состояния. Энергия. Работа. Теплота. Нулевой, первый, второй и третий законы термодинамики.
14. Теплопроводность, конвективный теплообмен, тепловое излучение. Закон Фурье и уравнение Фурье-Кирхгофа.
15. Теплоотдача и теплопередача. Расчет теплообменных аппаратов.
16. Диффузия, закон Фика. Уравнения неразрывности, конвективной диффузии. Движущие силы. Коэффициенты массоотдачи, массопередачи.
17. Методы расчета массообменных процессов на основе понятия теоретической ступени разделения и на основе коэффициентов массопередачи.
18. Сушка. Математические модели и аппараты. Кинетика сушки. Контактные сушилки.
19. Сушилки с псевдооживленным слоем. Особенности математического описания сушилок.
20. Кристаллизация. Описание роста кристаллов и зародышеобразования. Типы используемых кристаллизаторов. Математическая модель кристаллизатора с мешалкой.



21. Абсорбция. Равновесие и массопередача в системах жидкость–газ. Типы абсорбционных аппаратов, их математическое описание.

Описание равновесия в системах жидкость–пар.

22. Ректификация. Два подхода к описанию ректификации: равновесный и неравновесный.

23. Ректификационные аппараты. Их типы. Расчет тарельчатых ректификационных аппаратов.

24. Расчет насадочных ректификационных аппаратов.

25. Экстракция. Равновесие и массопередача в системах жидкость–жидкость. Типы используемых экстракционных аппаратов.

Математическая модель колонного экстрактора.

26. Мембранные процессы разделения. Общая характеристика мембранных способов разделения смесей. Их классификация.

27. Виды мембран. Описание процесса переноса в мембранах.

28. Гомогенные изотермические реакторы. Классификация реакторов по гидродинамическому признаку. Реактор периодического действия.

29. Проточный реактор с мешалкой. Каскад реакторов идеального смешения.

30. Реактор с продольным перемешиванием потока (ламинарный и турбулентный режимы). Выбор типа реактора с учетом селективности реакции.

31. Автотермические реакторы.

32. Гетерогенные каталитические реакторы, классификация каталитических реакторов по конструктивному и гидродинамическим признакам. Одно- и многослойные реакторы со стационарным слоем катализатора. Квазигомогенная и гетерогенная модели.

33. Реакторы с псевдоожиженным слоем катализатора.

## **Основная литература**

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973.
2. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987.
3. Кафаров В. В. Основы массопередачи. М.: Высш. шк., 1979.
4. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 1: Основы теории процессов химической технологии / Д. А. Баранов, А. В. Вязьмин, А. А. Гухман и др.; Под ред. А. М. Кутепова. М.: Логос, 2001.
5. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы / Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин и др.; Под ред. А. М. Кутепова. М.: Логос, 2001.
6. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1, 2 / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов и др. М.: Химия, 1999, 2000.
7. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1985.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
9. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969.

## **Дополнительная литература**

1. Химическая гидродинамика / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запрянов и др. М.: Бюро Квантум, 1996.
2. Нелинейная динамика и термодинамика необратимых процессов в химии и химической технологии / Э. М. Кольцова, Ю. Д. Третьяков, Л. С. Гордеев, А. А. Вертегел. М.: Химия, 2001.
3. Дытнерский Ю. И. Мембранные процессы разделения жидких смесей. М.: Химия, 1975.
4. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.

5. Теория тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. М.: Высш. шк., 1979.