



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП

  
(подпись) Реутов В.А.  
(Ф.И.О. рук. ОП)  
05 сентября 2017 г.



УТВЕРЖДАЮ»  
Заведующий базовой кафедрой  
химических и ресурсосберегающих технологий  
(название кафедры)

  
(подпись) Реутов В.А.  
(Ф.И.О. зав. каф.)  
05 сентября 2017 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Химические реакторы и макрокинетика

**Направление подготовки 18.03.01 Химическая технология**

профиль «Технология химических и нефтеперерабатывающих производств»

**Форма подготовки очная**

курс 4 семестр 8  
лекции 20 час.  
практические занятия нет  
лабораторные работы 30 час.  
в том числе с использованием МАО лек. 0 /пр.0 /лаб. 10 час.  
всего часов аудиторной нагрузки 50 час.  
в том числе с использованием МАО 10 час.  
самостоятельная работа 58 час.  
в том числе на подготовку к экзамену нет  
контрольные работы (количество) 1  
зачет 8 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ, утвержденного приказом ректора от 21.10.2016 № 12-13-2030

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физической и аналитической химии ШЕН, протокол № 17 от «20» июня 2017 г.

Заведующий кафедрой д.х.н., профессор Н.Б. Кондриков  
Составитель: доцент Васильева М.С.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## ABSTRACT

### **Bachelor's degree in 18.03.01 Chemical technology**

**Study profile:** Technology of oil processing and chemical production

**Course title:** Chemical reactors and macrokinetics

**Variable part of Block B1.B.DV.8.1, 3 credits**

**Instructor:** Vasilyeva M.S.

**At the beginning of the course a student should be able to:**

for successful study of the discipline, the following preliminary students' competences should be formulated:

- the ability and willingness to use the basic laws of natural sciences in professional activities (GPC-1);
- ability and willingness to carry out the process in accordance with the regulations and use technical means to measure the main parameters of the process, the properties of raw materials and products (PC-1).

**Learning outcomes:**

- the ability and willingness to use the basic laws of natural sciences in professional activities (GPC-1)
- readiness to use knowledge of the structure of matter, the nature of chemical bonding in various classes of chemical compounds for understanding the properties of materials and the mechanism of chemical processes occurring in the surrounding world (GPC-3)
- the ability to calculate the standards of material costs of raw materials, materials, reagents and catalysts used in the manufacture of products (PC-12)
- readiness to use knowledge of basic physical theories for solving emerging physical problems, independent acquisition of physical knowledge, for understanding the principles of operation of devices and devices, including those beyond the competence of a specific area (PC-22)

**Course description:** course «Chemical reactors and macrokinetics» means learning of the basic laws of chemical processes occurring in the reaction apparatus, and the fundamentals of the theory of chemical reactors, examines the basic methods and techniques for improving the efficiency of their work.

**Main course literature:**

1. Chorkendorf, Ib. Sovremennyy kataliz i khimicheskaya kinetika /I. Chorkendorf, KH. Naymantsvedrayt; per. s angl. V. I. Roldugina. - Dolgoprudnyy: Intellekt, 2010. - 501 s.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:289588&theme=FEFU>

2. Zakgeym A. YU. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya: vvedeniye v modelirovaniye khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Elektronnyy resurs] : ucheb. posobiye / A. YU. Zakgeym. - 3-ye izd., pererab. i dop. - Moscow.: Logos, 2012. - 304 s. - (Novaya universitetskaya biblioteka). - ISBN 978-5-98704-497-1.

<http://www.znaniyum.com/catalog.php?bookinfo=468690>

3. Budanov, V.V.- Khimicheskaya kinetika: Uchebnoye posobiye / V.V. Budanov, T.N. Lomova, V.V. Rybkin. - St. Petersburg.: Izdatel'stvo «Lan'», 2014. - 228 s.

<http://e.lanbook.com/view/book/42196>

4. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya. Metodologiya proyektirovaniya khi-miko-tekhnologicheskikh protsessov. Uchebnyk 2-izd. pererab., / Pod. red. KH.E. Kharlampidi. - St. Petersburg.: Izdatel'stvo «Lan'», 2014. - 448 s.

<http://e.lanbook.com/view/book/37357>

5. Laboratornyy praktikum po obshchey khimicheskoy tekhnologii : uchebnoye posobiye dlya vuzov po napravleniyam i spetsial'nostyam v oblasti khimicheskoy tekhnologii / [V. A. Aver'yanov, S. A. Batashov, N. P. Belova i dr.] ; pod obshch. red. V. S. Beskova. - Moscow.: Izdatel'stvo «BINOM. Laboratoriya znaniy», 2010. - 279 s.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:298118&theme=FEFU>

## АННОТАЦИЯ

Рабочая программа дисциплины «Химические реакторы и макрокинетика» разработана для студентов 4 курса направления подготовки 18.03.01 «Химическая технология», профиль «Технологии химических и нефтеперерабатывающих производств», в соответствии с требованиями ОС ВО ДВФУ по данному направлению.

Дисциплина Б1.В.ДВ.8.1 «Химические реакторы и макрокинетика» относится к дисциплинам по выбору вариативной части учебного плана.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 час. Учебным планом предусмотрены лекционные занятия (20 час.) и лабораторные занятия (30 час.), самостоятельная работа (58 час.). Дисциплина реализуется в 8 семестре 4 курса.

Дисциплина логически и содержательно связана с курсами «Органическая химия», «Физическая химия», «Физика», «Общая химическая технология», «Процессы и аппараты химической технологии».

Для успешного изучения дисциплины «Химические реакторы и макрокинетика» у обучающихся должны быть сформированы следующие предварительные компетенции, элементы компетенций:

ОПК-1 способностью и готовностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности;

ПК-1 способностью и готовностью осуществлять технологический процесс в соответствии с регламентом и использовать технические средства для измерения основных параметров технологического процесса, свойств сырья и продукции.

**Цель дисциплины:** освоения дисциплины «Химические реакторы» – изучение основных закономерностей химических процессов, протекающих в реакционных аппаратах, и основ теории химических реакторов, рассматриваются основные методы и приемы повышения эффективности их работы.

**Задачи дисциплины:**

- овладение основами теории химико-технологических процессов и конструкции современных химических реакторов;
- формирование знаний о принципах расчета химико-технологических процессов;
- формирование знаний новых тенденциях в области развития теории процессов и аппаратов.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие общепрофессиональные (ОПК) компетенции и профессиональные (ПК) компетенции (элементы компетенций).

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<p>ОПК-1</p> <p>способностью и готовностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности</p>	Знает	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основные понятия, соотношения и способы теоретического описания химических процессов и макрокинетики химических реакций;</li> <li>- начала термодинамики и основные уравнения химической термодинамики;</li> <li>методы термодинамического описания химических и фазовых равновесий в многокомпонентных системах;</li> <li>-уравнения формальной кинетики и кинетики сложных, цепных, гетерогенных и фотохимических реакций; основные теории гомогенного, гетерогенного и ферментативного катализа;</li> <li>- основы теории переноса тепла и массы; принципы физического моделирования химико-технологических процессов;</li> <li>- основные уравнения движения жидкостей; основы теории тепло- и массопередачи, типовые процессы и аппараты химической технологии.</li> </ul>
	Умеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- переходить от языка изложения основных положений фундаментальных дисциплин к доминирующему в теоретических основах химической технологии языку сплошных сред и обратно;</li> <li>-применять полученные знания при выполнении практических заданий, расчетов, осваивать вопросы, выносимые на самостоятельное изучение;</li> <li>- определять характер движения жидкостей и газов; характеристики процессов тепло- и массопередачи; рассчитывать параметры, выбирать аппаратуру для конкретного химико-технологического процесса;</li> <li>- проводить расчеты с использованием основных соотношений термодинамики поверхностных явлений и расчеты основных характеристик дисперсных систем;</li> <li>- составлять кинетические уравнения.</li> </ul>
	Владеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основами математического аппарата, применяемого для описания макрокинетики химических реакций, навыками проведения теоретического исследования при диффузионном режиме химических процессов;</li> <li>- навыками выполнять расчеты химико-технологических процессов с использованием математических моделей, моделирующих систем и современных прикладных программ с учетом макрокинетики.</li> </ul>
<p>ОПК-3</p> <p>готовностью использовать знания о строении вещества, природе химической</p>	Знает	<ul style="list-style-type: none"> <li>- методы построения эмпирических (статистических) и физико-химических (теоретических) моделей химико-технологических процессов; методы идентификации математических описаний технологических процессов на основе экспериментальных данных</li> </ul>

связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире	Умеет	- применять методы вычислительной математики и математической статистики для решения конкретных задач расчета, проектирования, моделирования, идентификации и оптимизации процессов химической технологии
	Владеет	- методами математической статистики для обработки результатов активных и пассивных экспериментов, пакетами прикладных программ для моделирования химико-технологических процессов; методами анализа эффективности работы химических производств
ПК-12 способностью рассчитывать нормативы материальных затрат сырья, материалов, реагентов и катализаторов, используемых в производстве продукции	Знает	- основные характеристики технологического процесса в соответствии с регламентом; - свойства сырья, материалов, реагентов, катализаторов и продукции, нормативы их качества; - физико-химические закономерности технологического процесса;
	Умеет	- анализировать свойства сырья и продукции; - оценивать эффективность действия катализаторов;
	Владеет	- навыками измерения характеристик основных параметров технологического процесса и оценивать их соответствие требуемым нормативам; - навыками статистической оценки параметров технологического процесса;
ПК-22 готовностью использовать знания основных физических теорий для решения возникающих физических задач, самостоятельного приобретения физических знаний, для понимания принципов работы приборов и устройств, в том числе выходящих за пределы компетентности конкретного направления	Знает	- процессы, протекающие на конкретных технологических линиях; - масштаб и структуру химических и физических процессов основных химических производств, их аппаратное оформление; - уровень материальных, энергетических и трудовых затрат и ресурсов для производства основных химических продуктов.
	Умеет	- определять характеристики основных параметров технологического процесса и оценивать их соответствие нормативам; - обоснованно выбирать приборы и оборудование для измерения основных параметров технологического процесса.
	Владеет	- способностью принимать решения по безопасному управлению технологическим процессом с целью обеспечения качества продукции; - методами управления и регулирования химико-технологических процессов, эффективности химического превращения сырья и полупродуктов в конечные продукты.

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Химические реакторы» применяются следующие методы активного/интерактивного обучения: лекция презентация (на лекционных занятиях); «лекция-беседа» (на лекционных занятиях).

## **СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Модуль I. Химико-технологические процессы (4 час.)**

#### **Тема 1. Понятие о химико-технологическом процессе (2 час.)**

Классификация химико-технологических процессов. Технологические критерии эффективности химико-технологического процесса. Стехиометрия в расчетах химических процессов. Основные технологические показатели, составление материального и теплового баланса. Степень превращения, выход и избирательность в химическом процессе. Время пребывания, распределение времени пребывания, перемешивание в химическом процессе

#### **Тема 2 Термодинамические и кинетические основы химического процесса (2 час.)**

Термодинамика и кинетика – основные количественные характеристики химического процесса. Константы равновесия химических реакций, тепловые эффекты реакций, зависимости констант равновесия и скорости химических реакций от температуры, значения констант скоростей, продолжительность химических реакций Термодинамические расчеты химико-технологических процессов. Расчет равновесия по термодинамическим данным. Использование законов химической кинетики при выборе технологического режима и моделировании технологических процессов. Формальная кинетика. Кинетические уравнения. Способы изменения скорости простых и сложных реакций. Кинетика динамических систем (кинетика химических реакций, протекающих в потоке).

### **Модуль II. Гетерогенные процессы (6 час.)**

#### **Раздел 1. Гетерогенные процессы (2 час.)**

##### **Тема 1. Общие сведения о гетерогенных процессах (1 час.)**

Гетерогенные процессы. Режимы реакций. Экспериментальные методы. Кинетика гетерогенных каталитических процессов в статическом и динамическом режимах.

##### **Тема 2. Схема гетерогенного процесса (1 час.)**

Модели гетерогенного процесса: «сжимающаяся сфера», «сжимающееся ядро». Наблюдаемая скорость гетерогенного процесса, время полного превращения. Режим процесса. Характерные признаки лимитирующей стадии, способы ее определения. Определяющий параметр для каждой лимитирующей стадии.

#### **Раздел II. Гетерогенно-каталитические процессы (4 час.)**

##### **Тема 1. Процессы переноса в каталитических реакциях (1 час)**

Процессы переноса в каталитических реакциях. Области протекания реакции. Понятие лимитирующей стадии.

## **Тема 2. Внешнедиффузионная область (1 час)**

Общие закономерности. Скорость процесса во внешнедиффузионной области. Тепловые режимы. Влияние различных факторов. Процесс на поверхности непористого катализатора.

## **Тема 3. Внутридиффузионная область (1 час.)**

Внутренняя диффузия. Молекулярная диффузия. Кнудсеновская диффузия. Пористая структура катализаторов, модели их пористой структуры. Выражения скорости реакции. Схема и математическая модель процесса в пористом зерне катализатора. Кинетические уравнения, метод решения. Перенос в гранулах и фактор эффективности (степень использования внутренней поверхности катализатора). Модуль Зельдовича-Тиле. Эффекты теплопереноса. Влияние внутренне-диффузионных факторов на скорость процессов.

## **Тема 4. Теоретические и экспериментальные критерии влияния диффузии (1 час.)**

Критерии влияния внешней диффузии. Критерии влияния внутренней диффузии. Критерии теплопереноса. Внешняя диффузия. Кажущаяся энергия активации гетерогенных реакций. Гетерогенно-каталитические процессы на пористом зерне катализатора. Макрокинетика. Диффузионное торможение. Неоднородность в реакторе. Аксиальная неоднородность. Примеры использования теоретических критериев.

## **Модуль III. Химические реакторы (10 час.)**

### **Тема 1. Уровни анализа, описания и расчета химических процессов, протекающих в химических реакторах (2 час.)**

Структура математической модели химического реактора. Уравнение материального баланса реактора. Классификация химических реакторов и режимов их работы. Понятия объемная скорость (*spacevelocity*), условного времени контакта (*spacetime*), способы их выражения.

### **Тема 2. Химические реакторы в изотермическом режиме (2 час.)**

Химические реакторы с идеальной структурой потока. Реактор идеального смешения (периодический и проточный). Реактор идеального вытеснения. Сравнение эффективности проточных реакторов идеального смешения и идеального вытеснения. Каскад реакторов идеального смешения. Химические реакторы с неидеальной структурой потоков. Распределение времени пребывания в проточных реакторах.

### **Тема 3. Теплоперенос в химических реакторах (2 час.)**

Уравнение теплового баланса реактора. Тепловые режимы химических реакторов: изотермический, адиабатический, промежуточный (политермический, политропический). Устойчивость теплового режима работы реактора.

Параметрическая чувствительность. Оптимальный температурный режим и способы его осуществления.

#### **Тема 4. Подходы к математическому моделированию каталитических реакторов (2 час.)**

Основные вопросы, исследуемые на основе математического моделирования Уравнения баланса массы и энергии. Стратифицированная модель каталитического реактора.

#### **Тема 5. Основные подходы к решению проблем химической кинетики: Физико-химический, или микроскопический и формально-кинетический, или макроскопический (1 час.)**

Элементы макрокинетической модели. Основные этапы построения макрокинетических моделей.

#### **Тема 6. Макрокинетический эксперимент, лабораторные микрореакторы, их математическое описание (1 час.)**

Макрокинетический эксперимент, лабораторные микрореакторы, их математическое описание. Численные методы идентификации и анализа кинетических моделей. Интегральный метод оценивания параметров. "Error-in-Variable" (EVM) метод идентификации кинетических моделей на базе экспериментов, получаемых в реакторе идеального смешения. Апостериорный анализ результатов идентификации.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Практические занятия**

Не предусмотрено.

### **Лабораторные занятия (30 час.)**

#### **Лабораторная работа 1. Химическое равновесие в многокомпонентной смеси (2 час.)**

Расчет равновесного состава реагирующей смеси в сложных и простых реакциях. Выбор оптимальных условий проведения исследуемого химического процесса.

#### **Лабораторная работа 2. Гетерогенные процессы и реакторы для гетерогенных процессов (4 час.)**

Определение области протекания гетерогенного процесса по экспериментальным данным. Расчет гетерогенного процесса в реакторах с различной организацией материальных потоков. Составление материального и теплового балансов гетерогенного процесса в реакторе.

### **Лабораторная работа 3. Параметры переноса в зернистом слое (4 час.)**

Расчет свойств газовой смеси по свойствам индивидуальных компонентов и параметров теплопереноса при прохождении потока газа через зернистый слой.

### **Лабораторная работа 4. Пористое зерно катализатора (4 час.)**

Расчет процесса в пористом зерне катализатора при протекании простой или сложной реакций:

- профиль степени превращения и концентрации в пористом зерне,
- наблюдаемая скорость превращения  $W_n$ ,
- степень использования внутренней поверхности  $\eta$  (эффективность процесса),
- наблюдаемая селективность процесса  $S_n$  (для сложной реакции).

### **Лабораторная работа 5. Теоретические критерии (4 час.)**

Критерии влияния внутренней диффузии. Критерии влияния внешней диффузии. Примеры использования теоретических критериев.

Закрепление навыков построения двухмерных моделей. Построение двух видов сложной модели.

### **Лабораторная работа 6. Окисление диоксида серы (процессы и реакторы) (4 час.)**

Расчет процесса и реактора окисления диоксида серы на ванадиевом катализаторе, используемый при разработке и анализе промышленного процесса.

### **Лабораторная работа 7. Трубчатые реакторы для гетерогенно-каталитических процессов (4 час.)**

Расчет профилей температуры и степеней превращения в трубчатом реакторе промышленных каталитических процессов.

### **Лабораторная работа 8. Реакторы в режимах идеального смешения и вытеснения (4 час.)**

Расчет степени превращения и температуры в проточных реакторах с различными режимами движения потока в них (идеального смешения, идеального вытеснения) и различными тепловыми режимами (изотермическим и с теплоотводом) при протекании реакций различного типа (простых и сложных).

## **II. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Химические реакторы» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

- план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;
- характеристика заданий для самостоятельной работы студентов и методические рекомендации по их выполнению;
- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы. (Приложение 1)

### III. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые модули/ разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	МОДУЛЬ 1. Физико-химические закономерности химических процессов	ОПК-1	Знает	Отчет по лабораторной работе № 1 (ПР-6)	Контрольная работа № 1 (ПР-1) Вопросы к экз. №1-15
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 1 (ПР-6)	
			Владеет	Домашние зад. № 1 (ПР-11)	
		ОПК-3	Знает	Отчет по лабораторной работе № 2 (ПР-6)	
			Умеет		
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 2 (ПР-6) Домашние задания № 3 (ПР-11)	
2	МОДУЛЬ 2. Гетерогенные и гетерогенно-каталитические процессы и реакторы	ОПК-3	Знает	Отчет по лабораторной работе № 3 (ПР-6)	Контрольная работа № 2 (ПР-1) Вопросы к экз. № 16-32
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 3 (ПР-6) Домашние зад. № 4 (ПР-11)	

			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 4 (ПР-6) Домашние зад. № 5 (ПР-11)	
		ПК-12	Знает	Отчет по лабораторной работе № 4 (ПР-6) Домашние зад. № 5 (ПР-11)	
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 5 (ПР-6) Домашние зад. № 6 (ПР-11)	
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 5 (ПР-6) Домашние зад. № 6 (ПР-11)	
3	МОДУЛЬ 3. Реакторы идеального смешения и вытеснения	ОПК-1	Знает	Отчет по лабораторной работе № 5 (ПР-6)	Контрольная работа № 2 (ПР-2) Вопросы к экз. №33-39
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 6 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 6 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
		ПК-22	Знает	Отчет по лабораторной работе № 6 (ПР-6)	
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 7 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 7 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
		ОПК-3	Знает	Отчет по лабораторной работе № 7 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 8 (ПР-6) Домашние зад. № 8 (ПР-11)	
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 8 (ПР-6) Домашние зад. № 8 (ПР-11)	

Контрольные и методические материалы, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы представлены в Приложении 2.

## IV. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Основная литература

*(электронные и печатные издания)*

1. Самойлов, Н.А. Примеры и задачи по курсу "Математическое моделирование химико-технологических процессов" : учебное пособие / Н. А. Самойлов. - Санкт-Петербург: Лань, 2011. -168 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:727522&theme=FEFU>

2. Закгейм А. Ю. Общая химическая технология: введение в моделирование химико-технологических процессов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Ю. Закгейм. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Логос, 2012. - 304 с. - (Новая университетская библиотека). - ISBN 978-5-98704-497-1.

3. ЭБС «Znanium.com»:

<http://www.znanium.com/catalog.php?bookinfo=468690>

4. Буданов, В.В.– Химическая кинетика: Учебное пособие / В.В. Буданов, Т.Н. Ломова, В.В. Рыбкин. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 228 с.

5. ЭБС «Elanbook.com»:

<http://e.lanbook.com/view/book/42196>

6. Общая химическая технология. Методология проектирования химико-технологических процессов. Учебник 2-изд. перераб., / Под. ред. Х.Э. Харлампи. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 448 с.

7. ЭБС «Elanbook.com»:

<http://e.lanbook.com/view/book/37357>

### Дополнительная литература

*(электронные и печатные издания)*

1. Киперман, С. Л. Основы химической кинетики в гетерогенном катализе. – Москва: Химия, 1979. – 348 с.

ЭК НБ ДВФУ:

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:693930&theme=FEFU>

2. Берлин, А.А. Макрокинетика // Сорровский образовательный журнал. – 1998. – № 3. – С. 48–54.

[http://window.edu.ru/resource/365/21365/files/9803\\_048.pdf](http://window.edu.ru/resource/365/21365/files/9803_048.pdf)

3. Розовский, А. Я. Гетерогенные химические реакции. Кинетика и макрокинетика / А. Я. Розовский ; [отв. ред. Ю. А. Колбановский] ; Академия наук СССР, Институт нефтехимического синтеза. – М.: Наука, 1980. – 323 с.

ЭК НБ ДВФУ:

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:41631&theme=FEFU>

4. Панченков, Г. М. Химическая кинетика и катализ : учебное пособие для вузов / Г. М. Панченков, В. П. Лебедев. – М.: Химия, 1974. – 592 с.

ЭК НБ ДВФУ:

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:58437&theme=FEFU>

5. Сеттерфилд, Ч. Практический курс гетерогенного катализа / Ч. Сеттерфилд ; пер. с англ. А. Л. Клячко, В. А. Швеца. – М.: Мир, 1984. – 520 с.

ЭК НБ ДВФУ:

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:50244&theme=FEFU>

6. Гумеров, А. М. Математическое моделирование химико-технологических процессов : учебное пособие для вузов / А. М. Гумеров. Санкт-Петербург.: Лань, 2014. – 176 с.

ЭБС «Elanbook.com»:

[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=41014](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=41014)

7. Франк-Каменецкий, Д. А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике : [учебник-монография] / Д. А. Франк-Каменецкий. – Долгопрудный : Интеллект , 2008. – 407 с.

ЭК НБ ДВФУ:

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:663867&theme=FEFU>

### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

1. База данных о веществах и их свойствах:  
<http://www.chemspider.com/>

2. База данных о веществах и их свойствах:  
<http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

3. Вшивков, В.А. Использование Современных информационных технологий для численного решения прямых химической кинетики / В.А. Вшивков, И.Г. Черных, В.Н. Снытников // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2005. – Т. 6, № 2. С. 71–76. Режим доступа : <http://elibrary.ru/item.asp?id=9085629>

4. Цаплин, С.В. Математическое моделирование процессов массопереноса и химических превращение в каталитических мембранных реакторах /

С.В. Цаплин, Э.М. Кольцова // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 1 (69). – С. 95-103.– Режим доступа : <http://elibrary.ru/item.asp?id=20174083>

5 Математическое моделирование химического реактора с диффузионной структурой потока для реакции n-го порядка / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова, Н. Н. Дикарева // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т. 18, № 22 (1250). – С. 5-29. – Режим доступа : <http://elibrary.ru/item.asp?id=20891892>

### **Перечень информационных технологий и программного обеспечения**

При осуществлении образовательного процесса по дисциплине «Химические реакторы» используется следующее программное обеспечение

Программное обеспечение:

- Системные программные средства: Microsoft Windows, Microsoft Vista
- Прикладные программные средства: Microsoft Office
- Специализированные программные комплексы «ОХТ\_LAB»

### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

При изучении дисциплины студентам целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. Приступая к изучению данной дисциплины, необходимо знать основные положения курсов «Физическая химия», «Органическая химия», «Общая и неорганическая химия», «Процессы и аппараты химических производств», «Общая химическая технология».

2. Изучение курса должно вестись систематически и сопровождаться составлением подробного конспекта лекций и конспекта материалов для самостоятельной проработки. Просмотрите конспект сразу после занятий, отметьте материал конспекта лекций, который вызывает затруднения для понимания. Попытайтесь найти ответы на затруднительные вопросы, используя рекомендованную литературу. Если самостоятельно не удалось разобраться в материале, сформулируйте вопросы и обратитесь к преподавателю за консультацией. Регулярно отводите время для повторения материала, проверяя свои знания, умения и навыки по контрольным вопросам.

3. После изучения модуля рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины модуля, ответить на контрольные вопросы, указанные в

методических указаниях для самостоятельной работы студентов. Такой метод дает возможность самостоятельно проверить готовность к тестированию.

Процесс изучения дисциплины включает в себя:

1. Работу под руководством преподавателя (лекции, практические работы, консультации преподавателя).

Самостоятельную работу студента. К самостоятельной работе студентов в ходе изучения дисциплины относят: подготовка к практическим работам; выполнение домашних заданий; изучение учебного материала, вынесенного на самостоятельную проработку; подготовка к экзамену. Распределение времени на выполнение различных видов самостоятельной работы приведено в Приложении 1.

2. Текущий контроль и промежуточная аттестация. Текущий контроль осуществляется в виде выполнения и сдаче домашних заданий, и выполнении самостоятельных работ и устных ответов на контрольные вопросы в ходе рубежного контроля и позволяет оценить степень освоения студентами отдельных тем дисциплины

3. Подготовка к экзамену осуществляется в следующем порядке: ознакомление с перечнем контрольных вопросов к зачету; повторение лекционного материала и конспектов; консультация с преподавателем по вопросам, в которых студент не смог разобраться самостоятельно.

## **VI. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Для осуществления образовательного процесса по дисциплине «Химические реакторы» на лекциях используется мультимедийное оборудование: ноутбук, проектор, экран.

Практические задания по данной дисциплине проводятся в компьютерной лаборатории.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

---

---

ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

По дисциплине «Химические реакторы и макрокинетика»

**Направление подготовки 18.03.01 Химическая технология**  
профиль «Технология химических и нефтеперерабатывающих производств»

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2017**

## План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения, неделя	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение, час	Форма контроля
1.	2	Отчет по практической работе № 1	2	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
2.	2	Домашнее задание № 1	4	Проверка домашнего задания
3.	3	Домашнее задание № 2	2	Проверка домашнего задания
4.	4	Домашнее задание № 3	2	Проверка домашнего задания
5.	5	Подготовка к контрольной работе №1	4	Контрольная работа
6.	6	Отчет по практической работе № 2	2	Проверка домашнего задания
7.	7	Домашнее задание № 4	4	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
8.	8	Отчет по практической работе № 3	2	Проверка домашнего задания
9.	9	Домашнее задание № 5	4	Проверка домашнего задания
10.	10	Домашнее задание № 6	2	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
11.	11	Отчет по практической работе № 4	2	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
12.	12	Отчет по практической работе № 5	2	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
13.	13	Подготовка к контрольной работе №2	4	Контрольная работа
14.	14	Отчет по практической работе № 6	2	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
15.	15	Отчет по практической работе № 7	4	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
16.	15	Домашнее задание № 7	2	Принятие отчета о выполнении лабораторной работы.
17.	16	Отчет по практической работе № 8	2	Проверка домашнего задания

18.	16	Домашнее задание № 8	6	Проверка домашнего задания
19.	17	Подготовка к контрольной работе №3	6	Контрольная работа

Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы; критерии оценки выполнения самостоятельной работы находятся в соответствии с Приказом № 12-13-850 от 12.05.2015 г. Об утверждении Положения о фондах оценочных средств образовательных программ высшего образования – программ бакалавриата, специалитета, магистратуры ДВФУ.

### **Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению**

Самостоятельная работа необходима при проработке материала лекции; подготовке к практическим работам, экзамену.

В самостоятельную работу по дисциплине «Химические реакторы и макрокинетика» включены следующие виды деятельности:

- изучение литературных источников;
- ознакомление с целями и с порядком выполнения практических работ;
- выполнение индивидуальных заданий, направленных на развитие у студентов самостоятельности и инициативы.
- - подготовка к промежуточному и итоговому контролю.

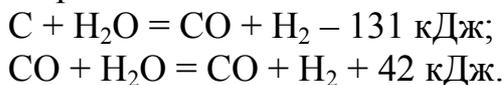
Для закрепления навыков и знаний, полученных на практических занятиях, студента в течение курса выдается 8 домашних заданий. Домашние задания закрепляют навыки текущей темы практических занятий.

#### **Домашнее задание № 1. «Стехиометрия. Материальный и тепловой баланс»**

<p><b>В 1</b></p> <p>1. В реакторе идеального смешения проходят реакции:</p> $A+B \rightarrow R$ $A+ A \rightarrow S$ $2S +B \rightarrow T + 2D$ $R + A \rightarrow T$ <p>Определить производительность реактора по вещества R и S при следующих условиях: <math>C_{A0}=2,0</math> кмоль/моль, <math>C_{B0}=1,7</math> кмоль/моль; текущие концентрации</p>
---

веществ  $C_A=0,1$  кмоль/моль,  $C_B=0,5$ кмоль/моль,  $C_T=0,15$ кмоль/моль,  $C_D=0,05$ кмоль/моль, скорость подачи  $V_0 = 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ . Считать, что концентрации продуктов в начальный момент времени равны 0.

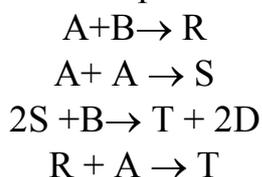
2. Составить материальный баланс процесса газификации 1 т кокса, идущей по реакциям:



В коксе содержится 3 % массовых долей зольных примесей, массовое соотношение пар/кокс = 1,5, степень превращения углерода в коксе – 0,98, выход оксида углерода – 0,90. Найти также общее количество подведенной теплоты.

#### В-2

1. В реакторе идеального смешения проходят реакции:



Определить производительность реактора по вещества R и S при следующих условиях:  $C_{A0}=2,0$  кмоль/моль,  $C_{B0}=1,7$  кмоль/моль; текущие концентрации веществ  $C_A=0,1$  кмоль/моль,  $C_B=0,5$ кмоль/моль,  $C_T=0,15$ кмоль/моль,  $C_D=0,05$ кмоль/моль, скорость подачи  $V_0 = 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ . Считать, что концентрации продуктов в начальный момент времени равны 0.

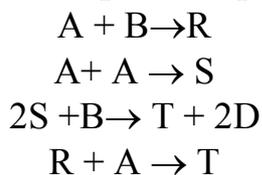
2. Составить материальный баланс и рассчитать выход  $\text{SO}_2$  при обжиге 1000 кг руды, содержащей 22 % массовых долей серы в виде сульфида цинка (остальное – несгораемые примеси) и при подаче полуторократного избытка воздуха по отношению к стехиометрии.



В огарке содержится 0,5 % массовых долей серы.

#### В 4

1. В реакторе идеального смешения проходят реакции:



Определить производительность реактора по вещества R и S при следующих условиях:  $C_{A0}=2,0$  кмоль/моль,  $C_{B0}=1,7$  кмоль/моль; текущие концентрации веществ  $C_A=0,1$  кмоль/моль,  $C_B=0,5$ кмоль/моль,  $C_T=0,15$ кмоль/моль,  $C_D=0,05$ кмоль/моль, скорость подачи  $V_0 = 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ . Считать, что концентрации продуктов в начальный момент времени равны 0.

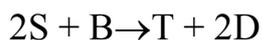
2. При дегидратации этилового спирта



Степень его превращения составила 80 %. Найти состав полученной смеси и выход продукта, если исходное количество спирта 0.18.

### В 5

1. В реакторе идеального смешения проходят реакции:



Определить производительность реактора по вещества R и S при следующих условиях:  $C_{A0}=2,0$  кмоль/моль,  $C_{B0}=1,7$  кмоль/моль; текущие концентрации веществ  $C_A=0,1$  кмоль/моль,  $C_B=0,5$  кмоль/моль,  $C_T=0,15$  кмоль/моль,  $C_D=0,05$  кмоль/моль, скорость подачи  $V_0 = 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ . Считать, что концентрации продуктов в начальный момент времени равны 0.

2. Рассчитать количество теплоты, выделяемой при переработке  $1000 \text{ м}^3$  сернистого газа, состоящего из 10 % объемных долей  $\text{SO}_2$  в воздухе. Степень превращения  $\text{SO}_2$  равна 90 %. Каким будет при этом состав смеси на выходе из реактора (в объемных долях, %)? Реакция:



Составить материальный баланс реактора окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  при переработке  $10\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  сернистого газа, содержащего 10 % объемных долей  $\text{SO}_2$  в воздухе.

## Домашнее задание № 2. «Термодинамика в расчетах химических процессов»

### В1

1. Вывести уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента A по известной величине  $K_c$  для реакции  $2\text{A} \rightleftharpoons \text{R}$ .

2. Рассчитать константу равновесия и равновесные концентрации окисления диоксида серы на ванадиевом катализаторе, если кислорода в смеси находится в 2 раза больше, чем требуется по стехиометрии. Степень превращения диоксида серы равна 0,99. Процесс проводится под атмосферным давлением. Исходная концентрация  $\text{SO}_2$  составляет 10% объемных долей.

### В2

1. Вывести уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента A в газофазной реакции по известным значениям константы равновесия  $K_p$  и давления  $P$  в системе для реакции  $\text{A} + \text{B} \rightleftharpoons \text{R}$ .

2. Рассчитать константу равновесия и равновесные концентрации реакции

восстановления диоксида углерода на графите, если степень превращения диоксида углерода равна 0,96. Процесс проводится под атмосферным давлением.

#### В 4

1. Вывести уравнение для расчета равновесного состава компонентов реакции синтеза аммиака по известным значениям константы равновесия  $K_p$  и давления  $P$  в системе.
2. Обратимая реакция  $A + B \rightleftharpoons 2R$  протекает при температуре 298 К и характеризуется тепловым эффектом  $\Delta H_{298}^0 = -30\,000$  кДж/кмоль и изменением удельной энтропии  $\Delta S_{298}^0 = -80$  кДж/(кмоль·К). Определить, во сколько раз изменится равновесная степень превращения реагентов, если соотношение начальных концентраций реагентов  $C_{A0}:C_{B0}$  изменится от 0,5 до 0,25.

#### В5

1. Вычислите величины  $K_c, K_N, K_n$  для равновесной реакции



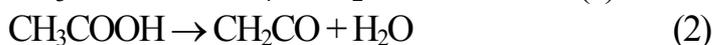
если при температуре 580 °С найдена  $K_p = 0,20$ , общее давление  $p = 0,005$  МПа.

2. Найдите константу равновесия при температурах 500 и 2000 К для реакции  $H_2O + CO \rightleftharpoons H_2 + CO_2$ , если  $\Delta G_{500}^0 = 20,2$  кДж/моль и  $\Delta G_{2000}^0 = 25,3$  кДж/моль.

### Домашнее задание № 3. «Кинетика в расчетах химических процессов»

#### В 1

1. Определить энергию активации и предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса для константы скорости реакции, значения которой при температурах 273 и 293 К равны соответственно 2,46 и 47,5 с<sup>-1</sup>.
2. При высокой температуре уксусная кислота разлагается по двум направлениям:



Константа скорости и энергия активации реакции (1) при температуре 1189 К равны соответственно 3,74 с<sup>-1</sup> и 155 000 Дж/моль; для реакции (2) соответственно - 4,65 с<sup>-1</sup> и 184 000 Дж/моль. Рассчитать время, необходимое для того, чтобы уксусная кислота прореагировала на 99%, и максимальный выход кетена.

#### В 2

1. Определить энергию активации реакции, если при изменении температуры с 723 до 773 К ее скорость возрастает в 2,73 раза.
2. Протекает последовательная реакция первого порядка  $A \rightarrow R \rightarrow S$ . Концентрация промежуточного продукта достигает максимального значения через 170 мин. Рассчитайте константы скоростей этих реакций, если  $x_A = 0,4$ .

#### В 4

2. Для последовательной реакции первого порядка  $A \rightarrow R \rightarrow S$  рассчитайте  $C_{R\max}$ , если: 1)  $k_1 \gg k_2$ ; 2)  $k_1 = k_2$ ; 3)  $k_1 \ll k_2$ .

2. Две параллельные реакции



$a_2A + b_2B = yY + zZ$  (побочная реакция) характеризуются кинетическими уравнениями

$$W_{\text{цел}} = k_1 C_A^{0,8} C_B^{1,54}$$

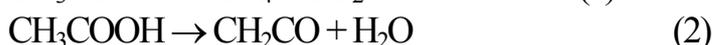
$$W_{\text{поб}} = k_1 C_A^{1,5} C_B^{0,5}$$

и энергиями активации  $E_1 = 45$  кДж/моль,  $E_2 = 65$  кДж/моль. Проанализируйте зависимость дифференциальной селективности для такой системы реакций от: а) концентрации реагентов А и В; б) температуры. Какие можно дать рекомендации по выбору технологического режима для этого процесса?

#### В 5

1. Для обратимой экзотермической реакции  $A \leftrightarrow R + Q_p$  зависимость константы равновесия от температуры задана в виде  $\ln K_p = 9000/T - 27$ . Экспериментально установлено, что при температуре  $30^\circ\text{C}$  за время 1140 с степень превращения вещества А  $x_A = 0,79$ , при  $40^\circ\text{C}$  за 480 с -  $x_A = 0,65$ . Построить зависимость степени превращения вещества А от температуры и определить оптимальную температуру, при которой достигается максимальная степень превращения, если продолжительность реакции составляет 300 с.

2. При высокой температуре уксусная кислота разлагается по двум направлениям:



Константа скорости и энергия активации реакции (1) при температуре 1189 К равны соответственно  $3,74 \text{ с}^{-1}$  и 155 000 Дж/моль; для реакции (2) соответственно -  $4,65 \text{ с}^{-1}$  и 184 000 Дж/моль. Рассчитать время, необходимое для того, чтобы уксусная кислота прореагировала на 99%, и максимальный выход кетена.

### Домашнее задание № 4. «Гетерогенные процессы и гетерогенные реакторы»

#### В -1

Горение жидкого топлива протекает во внешнедиффузионной области. Топливо впрыскивается в камеру сгорания, образуя капли диаметром 0,1 мм, летящие со скоростью 1,5 м/с. Известно, что капля топлива диаметром 0,3 мм полностью сгорает в потоке такой же скорости за 2 с.

Какова длина участка пламени, в котором полностью сгорает топливо?

### В -2

Гранулированный колчедан подается в печь обжига с движущимся слоем колчедана. Фракционный состав колчедана следующий: 10 % массовых долей частиц с  $R_0 = 3$  мм; 20 % массовых долей частиц с  $R_0 = 4$  мм, 70 % массовых долей частиц с  $R_0 = 6$  мм. Среднее время пребывания частиц в зоне реакции равно 6 мин. Время полного сгорания частиц равно соответственно 3,5; 5 и 8 мин.

Определить среднюю степень превращения колчедана, если процесс лимитируется:

- 1) химической реакцией;
- 2) внешней диффузией;
- 3) внутренней диффузией.

### В -4

Гетерогенный процесс описывается реакцией  $A_T + B_T \rightarrow R_T + S_{ТВ}$  и лимитируется внутридиффузионной областью. Твердые частицы размером 10 мм полностью реагируют за 15 мин. За время пребывания твердая часть реагирует на 80 %. При переводе процесса в кинетическую область время полного превращения частиц твердого вещества становится равным 12 мин, а при переводе его во внешнедиффузионную область – 10 мин.

Определить степень превращения твердого вещества в кинетической и внешнедиффузионной областях за аналогичное время пребывания.

### В -5

Обжиг ZnS проводится в наклонном вращающемся трубчатом реакторе. Частицы твердого вещества движутся в реакторе со скоростью 10 см/с. Известно, что при данных условиях за 1 мин степень превращения ZnS составляет 70 %.

Определить длину реактора, обеспечивающего 95%-ную степень превращения исходного сырья, если обжиг проводится в кинетической области.

## Домашнее задание № 5 «Пористое зерно катализатора»

### Вариант 1

1. Проводится необратимая реакция второго порядка  $A + B \rightarrow C + D$  на цилиндрическом пористом катализаторе с радиусом 0,4 мм. Температурная зависимость константы скорости определяется уравнением  $k = 2.1 \cdot 10^6 \exp(-3600/T)$ . Температура проведения реакции составляет 400 К. Эффективный коэффициент диффузии составляет 0,2 см<sup>2</sup>/с. Начальная концентрация компонента А равна 0,3 моль/л, концентрация компонента В равна 0,6 моль/л. Степень превращения  $x$  при  $R=R_0$  равна 0,34.

Определить, как изменится наблюдаемая скорость процесса и степень использования внутренней поверхности катализатора, если взять катализатор с радиусом 0,2 мм.

### Вариант 2

Проводится необратимая реакция второго порядка  $A + B \rightarrow C + D$  на шарообразном пористом катализаторе с радиусом 0.5 мм. Температурная зависимость константы скорости определяется уравнением  $k = 3.4 \cdot 10^6 \exp(-7600/T)$ . Температура проведения реакции составляет 800 К. Эффективный коэффициент диффузии составляет  $0,3 \text{ см}^2/\text{с}$ . Начальная концентрация компонента А равна 0,6 моль/л, концентрация компонента В равна 0,4 моль/л. Степень превращения  $x$  при  $R=R_0$  равна 0,24.

Определить, как изменится наблюдаемая скорость процесса и степень использования внутренней поверхности катализатора, если взять катализатор с радиусом 0,2 мм.

### Вариант 3

Проводится необратимая реакция второго порядка  $A + B \rightarrow C + D$  на цилиндрическом пористом катализаторе с радиусом 0.4 мм. Температурная зависимость константы скорости определяется уравнением  $k = 6.7 \cdot 10^6 \exp(-6900/T)$ . Температура проведения реакции составляет 900 К. Эффективный коэффициент диффузии составляет  $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$ . Начальная концентрация компонента А равна 0,3 моль/л, концентрация компонента В равна 0,6 моль/л. Степень превращения  $x$  при  $R=R_0$  равна 0,14.

Определить, как изменится наблюдаемая скорость процесса и степень использования внутренней поверхности катализатора, если взять катализатор с радиусом 0,02 мм.

### Вариант 4

Проводится необратимая реакция второго порядка  $A + B \rightarrow C + D$  на пластинчатом пористом катализаторе с толщиной 0.8 мм. Температурная зависимость константы скорости определяется уравнением  $k = 2.1 \cdot 10^6 \exp(-3600/T)$ . Температура проведения реакции составляет 670 К. Эффективный коэффициент диффузии составляет  $0,12 \text{ см}^2/\text{с}$ . Начальная концентрация компонента А равна 0,3 моль/л, концентрация компонента В равна 0,6 моль/л. Степень превращения  $x$  при  $R=R_0$  равна 0,27.

Определить, как изменится наблюдаемая скорость процесса и степень использования внутренней поверхности катализатора, если взять катализатор с толщиной 0,5 мм.

### Домашнее задание № 6. «Внутридиффузионная область»

1. Рассчитать  $D_{\text{eff}}$  для диффузии газа при 700 К и 10 атм (1 МПа) в порах алюмосиликатного катализатора ( $S_{\text{уд}}=198 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $D_{\text{ср}}=147 \text{ \AA}$ ) с долей незаполненно-

го объема 40% и узким распределением пор по размерам. Определить преобладающую диффузию (по вариантам).

Коэффициенты диффузии некоторых бинарных смесей газов.

№ п/п	Смесь газов	Т.К	$D_{12}$ , см <sup>2</sup> /с	№ п/п	Смесь газов	Т.К	$D_{12}$ , см <sup>2</sup> /с
1	Азот-аммиак	298	0,230	16	Водород-кислород	273	0,697
2	Азот-иод	273	0,070	17	Водород-метан	288	0,694
3	Азот-кислород	273	0,181	18	Водород-пропан	300	0,450
4	Азот-этилен	298	0,163	129	Водород-этанол	340	0,576
5	Аргон-неон	293	0,329	20	Водород-этилен	298	0,602
6	Вода-азот	307,5	0,256	21	Воздух-аммиак	273	0,198
7	Вода-водород	307,2	1,020	22	Воздух-бензол	298	0,0952
8	Вода-гелий	307	0,902	23	Воздух-вода	298	0,250
9	Вода-диоксид углерода	307,4	0,198	24	Воздух-диоксид серы	273	0,122
10	Вода-кислород	332	0,352	25	Воздух-диоксид углерода	273	0,136
11	Вода-метан	307,6	0,292	26	Воздух-дифенил	491	0,160
12	Вода-этилен	307,7	0,204	27	Воздух-иод	298	0,0834
13	Водород-азот	293	0,760	28	Воздух-кислород	273	0,175
14	Водород-аммиак	298	0,783	29	Воздух-метанол	298	0,162
15	Водород-бензол	273	0,317	30	Воздух-этанол	298	0,132

2. Изучали каталитическое дегидрирования циклогексана при пропускании его при 450 °С и 2,5 МПа через неподвижный слой катализатора алюмоплатинового катализатора с диаметром частиц 4,8 мм. Чтобы предотвратить отложение кокса, к исходному реагенту обычно добавляют большой избыток водорода. Принять отношение водород/углеводород = 4.  $\Delta H = +220$  кДж/моль. При объемной скорости подачи, равной 50 (см<sup>3</sup>/ч см<sup>3</sup> реактора) степень превращения составляла 90 %. Эффективная плотность слоя катализатора равна 0,55 (г/см<sup>3</sup> реактора). Характеристики промышленного алюмо-

платинового катализатора: средний радиус пор 54,3 нм, плотность частиц катализатора 0,98 г/см<sup>3</sup>, порозность слоя 0,389, удельная поверхность 6,4 м<sup>2</sup>/г, коэффициент теплопроводности = 0,22 Вт/(мК).

Задания:

1. Определить  $\Phi_s$  и сделать заключение о степени внутренне-диффузионного торможения.
2. Оценить разогрев внутри гранулы катализатора и сделать заключение об изотермичности или неизотермичности процесса.

**Домашнее задание № 7. «Реакторы идеального смешения и вытеснения. Изотермический режим»**

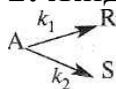
В 1
<p>1. Жидкофазная обратимая реакция <math>2A \leftrightarrow R</math>; проводится в РИС-н объемом 2,6 м<sup>3</sup>. Константа скорости прямой реакции <math>k_1 = 31,4 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})</math>, обратной – <math>k_2 = 2 \text{ мин}^{-1}</math>. Концентрация исходного вещества 0,6 моль/л. Требуемая степень превращения <math>x_A = 0,8</math>. Определить производительность реактора по продукту R.</p> <p>2. Газофазная необратимая реакция второго порядка <math>A \rightarrow 3R</math> исследовалась в опытном реакторе, представляющем собой трубу длиной 1,8 м и диаметром 2,54 см. Реакцию изучали при температуре 350 °С под давлением <math>4,9 \cdot 10^5</math> Па. Расход исходной смеси газа составлял <math>31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}</math>. При этих условиях была достигнута степень превращения <math>x_A = 0,6</math>. Промышленный процесс проводят при температуре 350 °С и давлении <math>2,45 \cdot 10^6</math> Па. Мощность промышленной установки по газу составляет <math>2,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}</math>. Исходная газовая смесь содержит 50% вещества A и 50% инерта. Требуемая степень превращения 0,8. Определить, какое количество труб указанного размера должен иметь промышленный реактор.</p>
В 2
<p>1. В реакторе протекает реакция второго порядка <math>2A \rightarrow R</math> с константой скорости реакции равной <math>2,8 \cdot 10^{-1} \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с})</math>. Начальная концентрация вещества A на входе в реактор равна 0,85 моль/л, степень превращения вещества A – 0,9. Определить, какое количество вещества A можно переработать в РИС-н объемом 2 м<sup>3</sup> и в РИВ объемом 0,6 м<sup>3</sup>.</p> <p>2. Газофазный процесс, описываемый простой необратимой реакцией <math>2A \rightarrow 3R + S</math> первого порядка, проводится при температуре 457°С и давлении <math>9,81 \cdot 10^5</math> Па. Константа скорости равна <math>1,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}</math>, скорость подачи исход-</p>

ного реагента –  $2,5 \cdot 10^{-3}$  кмоль/с, требуемая степень превращения 0,9. Определить объем реактора идеального вытеснения для проведения данного процесса.

В 3

1. Жидкофазная обратимая реакция второго порядка  $A + B = R + S$  проводится в реакторе идеального смешения объемом 40 л. Константа скорости прямой реакции  $k_1 = 1,8$  л/(моль·мин), обратной -  $k_2 = 0,8$  л/(моль·мин). Вещества А и В подаются отдельно в стехиометрическом соотношении. Концентрации веществ в индивидуальных потоках равны 0,5 моль/л. Определить, какое количество веществ А и В перерабатывается за 1 ч, если степень превращения вещества А составляет 0,85 от равновесной.

2. Жидкофазный процесс описывается реакцией



Константы скоростей реакций  $k_1 = 3,8$  мин<sup>-1</sup>;  $k_2 = 1,5$  мин<sup>-1</sup>. Исходная концентрация вещества А равна 1,4 моль/л. Требуемая степень  $x_A = 0,9$ . Определить, какое количество вещества А можно переработать в РИС-н объемом 0,6 м<sup>3</sup> и в РИВ объемом 0,2 м<sup>3</sup>. Рассчитать селективность и производительность по целевому продукту R.

В 4

1. В жидкофазном процессе протекает реакция второго порядка  $2A \rightarrow R$  с константой скорости реакции равной 2,3 л/(моль·мин). Объемный расход смеси с концентрацией исходного реагента  $C_{A0} = 0,5$  кмоль/м<sup>3</sup> равен 3,6 м<sup>3</sup>/ч. Определить производительность РИС-н объемом 0,4 м<sup>3</sup> по продукту R. Рассчитать объем РИВ для полученной производительности.

2. Определить объем реактора идеального вытеснения для проведения процесса разложения фосфина. Реакция  $2PH_3 = 2P(r) + 3H_2$  протекает по первому порядку.

Процесс проводится под давлением  $4,51 \cdot 10^5$  Па и при температуре 377 °С. Расход фосфина составляет  $5,03 \cdot 10^{-4}$  кмоль/с. Константа скорости реакции равна  $2,78 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Газовая постоянная  $R = 0,804 \cdot 10^4$  Па·м<sup>3</sup>/(кмоль·град). Требуемая степень превращения фосфина равна 0,8.

**Домашнее задание № 8. «Реакторы идеального смешения и вытеснения. Неизотермический режим»**

В 1

1. В реакторе идеального смешения непрерывного действия, работающем в адиабатических условиях, проводится экзотермическая реакция  $A \rightarrow R + Q_p$ . Тепловой эффект реакции составляет 160 кДж/кмоль. Раствор вещества А с концентрацией 0,2 молярной доли подается в реактор с температурой 52 °С. В результате адиабатического разогрева при достижении степени превращения  $x_A = 0,93$  температура повышается на 43 °С. Определить сред-

нюю теплоемкость реакционного раствора.

2. В каскаде из трех реакторов равного объема проводится жидкофазная реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  при температуре 368 К. Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6$  Дж/кг. Константа скорости реакции,  $s^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho c_p = 4,2 \cdot 10^6$  Дж/град остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества А в потоке равна  $1 \text{ кмоль/м}^3$ , молярная масса вещества А – 100 кг/кмоль, производительность каскада по продукту R –  $0,375 \cdot 10^{-3}$  кмоль/с, требуемая степень превращения вещества А – 0,95. Первый реактор каскада работает в адиабатическом режиме, второй и третий – с отводом теплоты. Температура реакционной смеси падает в трубопроводах между первым и вторым реактором на 3 град, а между вторым и третьим на 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной смеси к охлаждающей воде равен  $11000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ . Температура охлаждающей воды в теплообменниках второго и третьего реакторов составляет 288 К.

Определить: поверхность теплообмена во втором и третьем реакторах каскада; необходимую температуру смеси на входе и первый реактор каскада; объем единичного реактора каскада. Показать, что первый реактор каскада работает в устойчивом режиме.

## В 2

1. В реакторе идеального смешения непрерывного действия проводится экзотермическая реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  с тепловым эффектом равным 190 кДж/кмоль. Расход реагента А с температурой 15 °С составляет 0,2 кмоль/с, теплоемкость реакционной смеси – 16,7 кДж/(кмоль·К), температура реакционной смеси на выходе из реактора – 49 °С, степень превращения по веществу А – 0,8, средняя разность температур между охлаждающим агентом и реакционной смесью – 10 град, коэффициент теплопередачи равен  $419 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К)}$ . Определить количество отводимой или подводимой теплоты и требуемую площадь теплообмена.

2. В каскаде из трех реакторов равного объема проводится жидкофазная реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  при температуре 368 К. Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6$  Дж/кг. Константа скорости реакции,  $s^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho c_p = 4,2 \cdot 10^6$  Дж/град остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества А в потоке равна  $1 \text{ кмоль/м}^3$ , молярная масса вещества А – 100 кг/кмоль, производительность каскада по продукту R –  $0,375 \cdot 10^{-3}$  кмоль/с, требуемая степень превращения вещества А – 0,95. Первый реактор каскада работает в адиабатическом режиме, второй и третий – с отводом теплоты. Температура реакционной смеси падает в трубопроводах между первым и вторым реактором на 3 град, а между вторым и третьим на 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной смеси к охлаждающей воде равен  $11000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ . Температура охлаждающей воды в теплообменниках второго и третьего реакторов составляет 288 К.

Определить: поверхность теплообмена во втором и третьем реакторах каскада; необходимую температуру смеси на входе и первый реактор каскада; объем единичного реактора каскада. Показать, что первый реактор каскада работает в устойчивом режиме.

### В 3

1. Необратимая экзотермическая реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  с константой скорости,  $c^{-1}$ , описываемой уравнением  $k = 2,7 \cdot 10^8 \exp(-7900/T)$ , проводится в каскаде из трех реакторов идеального смешения равных по объему  $2 \text{ м}^3$ . Тепловой эффект реакции составляет  $6,5 \cdot 10^7 \text{ Дж/кмоль } A$ , концентрация исходного реагента –  $0,5 \text{ кмоль/м}^3$ . Теплоемкость реакционной смеси равна  $2400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ , а плотность –  $850 \text{ кг/м}^3$  и не зависят от степени превращения и температуры. Реакционная смесь подается в реактор с температурой  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  и скоростью  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Определить, какое количество теплоты надо подводить или отводить от каждого реактора, если в них поддерживать следующие температуры:  $15; 25; 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. В каскаде из трех реакторов равного объема проводится жидкофазная реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  при температуре  $368 \text{ К}$ . Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ . Константа скорости реакции,  $c^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho c_p = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/град}$  остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества  $A$  в потоке равна  $1 \text{ кмоль/м}^3$ , молярная масса вещества  $A$  –  $100 \text{ кг/кмоль}$ , производительность каскада по продукту  $R$  –  $0,375 \cdot 10^3 \text{ кмоль/с}$ , требуемая степень превращения вещества  $A$  –  $0,95$ . Первый реактор каскада работает в адиабатическом режиме, второй и третий – с отводом теплоты. Температура реакционной смеси падает в трубопроводах между первым и вторым реактором на  $3 \text{ град}$ , а между вторым и третьим на  $5 \text{ град}$ . Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной смеси к охлаждающей воде равен  $11000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ . Температура охлаждающей воды в теплообменниках второго и третьего реакторов составляет  $288 \text{ К}$ .

Определить: поверхность теплообмена во втором и третьем реакторах каскада; необходимую температуру смеси на входе и первый реактор каскада; объем единичного реактора каскада. Показать, что первый реактор каскада работает в устойчивом режиме.

### В 5

1. Экзотермическая реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  проводится в непрерывном реакторе идеального смешения, работающем в адиабатическом режиме. Тепловой эффект реакции равен  $149 \text{ кДж/моль}$ . Исходная концентрация вещества  $A$  составляет  $0,25$  молярной доли. Теплоемкость реакционной смеси постоянна и равна  $2,2 \text{ кДж/(моль} \cdot \text{К)}$ . Требуемая степень превращения вещества  $A$  составляет  $0,95$ .

Определить температуру реакционной смеси на входе в реактор, если зависимость  $x_A = f(T)$  представлена следующими данными:

$T, ^\circ\text{C}$	120	130	140	150	160	170	180	190	200
---------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$x_A$	0,04	0,07	0,17	0,29	0,55	0,79	0,88	0,92	0,95
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Отвечает ли полученный результат устойчивому режиму работы реактора идеального смешения?

**2.** В каскаде из трех реакторов равного объема проводится жидкофазная реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  при температуре 368 К. Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6$  Дж/кг. Константа скорости реакции,  $c^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho c_p = 4,2 \cdot 10^6$  Дж/град остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества А в потоке равна 1 кмоль/м<sup>3</sup>, молярная масса вещества А – 100 кг/кмоль, производительность каскада по продукту R -  $0,375 \cdot 10^{-3}$  кмоль/с, требуемая степень превращения вещества А – 0,95. Первый реактор каскада работает в адиабатическом режиме, второй и третий - с отводом теплоты. Температура реакционной смеси падает в трубопроводах между первым и вторым реактором на 3 град, а между вторым и третьим па 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной смеси к охлаждающей воде равен 11000 Вт/(м<sup>2</sup> К). Температура охлаждающей воды в теплообменниках второго и третьего реакторов составляет 288 К.

Определить: поверхность теплообмена во втором и третьем реакторах каскада; необходимую температуру смеси на входе и первый реактор каскада; объем единичного реактора каскада. Показать, что первый реактор каскада работает в устойчивом режиме.

#### В 4

**1.** В проточном реакторе идеального смешения объемом 2 м<sup>3</sup> проводится необратимая экзотермическая реакция с константой скорости,  $c^{-1}$ , описываемой уравнением  $k = 10^{12} \exp[-90000/(RT)]$ . Теплоемкость реакционной смеси равна 20790 Дж/(кг·К) и не зависит от температуры и степени превращения. Плотность реакционной смеси остается постоянной и равной 1000 кг/м<sup>3</sup>. Исходный реагент с концентрацией 6 кмоль/м<sup>3</sup> подается в реактор со скоростью 5 м<sup>3</sup>/ч. Тепловой эффект реакции равен 96600 Дж/моль. Температура в реакторе не должна превышать 333 К. Рассчитать, при какой температуре следует подавать исходный раствор, чтобы процесс протекал в адиабатическом режиме.

**2.** В каскаде из трех реакторов равного объема проводится жидко-фазная реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  при температуре 368 К. Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6$  Дж/кг. Константа скорости реакции,  $c^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho c_p = 4,2 \cdot 10^6$  Дж/град остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества А в потоке равна 1 кмоль/м<sup>3</sup>, молярная масса вещества А – 100 кг/кмоль, производительность каскада по продукту R -  $0,375 \cdot 10^{-3}$  кмоль/с, требуемая степень превращения вещества А – 0,95. Первый реактор каскада работает в адиабатическом режиме, второй и третий - с отводом теплоты. Температура реакционной смеси падает в трубопроводах между первым и вторым реактором на 3 град, а между вторым и третьим па 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакци-

онной смеси к охлаждающей воде равен  $11000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . Температура охлаждающей воды в теплообменниках второго и третьего реакторов составляет  $288 \text{ К}$ .

Определить: поверхность теплообмена во втором и третьем реакторах каскада; необходимую температуру смеси на входе и первый реактор каскада; объем единичного реактора каскада. Показать, что первый реактор каскада работает в устойчивом режиме.

### **Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы**

Студенту следует тщательно планировать и организовывать время, необходимое для изучения дисциплины. Недопустимо откладывать ознакомление с теоретической частью, подготовку отчетов к практическим работам и выполнение домашних заданий, поскольку это неминуемо приведет к снижению качества освоения материала, оформления отчетов и домашних заданий. Все виды работ по дисциплине рекомендуется выполнять по календарному плану, приведенному в Таблице 1.1.

В рамках данной дисциплины предусмотрено 90 часов самостоятельной работы, которая необходима при проработке материала лекции; подготовке к практическим работам, экзамену.

В самостоятельную работу по дисциплине «Химические реакторы и макрокинетика» включены следующие виды деятельности:

- изучение литературных источников;
- выполнение индивидуальных заданий, направленных на развитие у студентов самостоятельности и инициативы.
- подготовка к текущему и промежуточному контролю.

Решение задач проводится студентами индивидуально и оценивается по пятибалльной системе.

Готовые расчетные задачи представляются в электронной форме, подготовленные как текстовые документы в редакторе MSWord.

Решение должно включать всю информацию по выполнению задания, в том числе, уравнения реакций, графики, расчеты и т. д.

Структурно решение задач, как текстовый документ, комплектуется по следующей схеме:

Титульный лист – обязательная компонента (титульный лист отчета должен размещаться в общем файле, где представлен текст отчета).

Исходные данные к выполнению заданий – обязательная компонента отчета, с новой страницы, содержат указание варианта, темы и т.д.).

Основная часть – подробное решение задачи, при необходимости с уравнениями реакций, графиками и т.д.

### *Оформление решенных задач.*

Необходимо обратить внимание на следующие аспекты в оформлении отчетов работ:

- набор текста;
- структурирование работы;
- оформление заголовков всех видов (рубрик-подрубрик-пунктов-подпунктов, рисунков, таблиц, приложений);
- оформление перечислений (списков с нумерацией или маркировкой);
- оформление таблиц;
- оформление иллюстраций (графики, рисунки, фотографии, схемы);
- набор и оформление математических выражений (формул);
- оформление списков литературы (библиографических описаний) и ссылок на источники, цитирования.

Набор текста осуществляется на компьютере, в соответствии со следующими требованиями:

- печать – на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (размер 210 на 297 мм);
- интервал межстрочный – полуторный;
- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта - 14 пт, в том числе в заголовках (в таблицах допускается 10-12 пт);
- выравнивание текста – «по ширине»;
- поля страницы - левое – 25-30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 20 мм;
- нумерация страниц – в правом нижнем углу страницы (для страниц с книжной ориентацией), сквозная, от титульного листа до последней страницы, арабскими цифрами (первой страницей считается титульный лист, на котором номер не ставится, на следующей странице проставляется цифра «2» и т. д.).
- режим автоматического переноса слов, за исключением титульного листа и заголовков всех уровней (перенос слов для отдельного абзаца блокируется средствами MSWord с помощью команды «Формат» – абзац при выборе опции «запретить автоматический перенос слов»).

Если рисунок или таблица размещены на листе формата больше А4, их следует учитывать как одну страницу. Номер страницы в этих случаях допускается не проставлять.

### **Критерии оценки выполнения самостоятельной работы**

Оценка «Отлично»

- А) Задание выполнено полностью.
- Б) Подробно описаны все действия.
- В) Ответы на каждом этапе расчетной задачи верны.
- Г) Грамотное оформление.

Оценка «Хорошо»

- А), Б) - те же, что и при оценке «Отлично».
- В) Неточность в конечном этапе задачи.
- Г) Грамотное оформление.

Оценка «Удовлетворительно»

- А), Б) - те же, что и при оценке «Отлично».
- В) Неточности в ответах нескольких этапов задачи.
- Г) Грамотное оформление.

Оценка «Неудовлетворительно»

- А) Программа не выполнена полностью.
- Б) Ответы неверны на всех этапах задачи.
- В) Неграмотное оформление.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

---

ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

По дисциплине «Химические реакторы и макрокинетика»

**Направление подготовки 18.03.01 Химическая технология**  
профиль «Технология химических и нефтеперерабатывающих про-  
изводств»

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2017**

## ПАСПОРТ ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<p>ОПК-1</p> <p>способностью и готовностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности</p>	Знает	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основные понятия, соотношения и способы теоретического описания химических процессов и макрокинетики химических реакций;</li> <li>- начала термодинамики и основные уравнения химической термодинамики;</li> <li>методы термодинамического описания химических и фазовых равновесий в многокомпонентных системах;</li> <li>-уравнения формальной кинетики и кинетики сложных, цепных, гетерогенных и фотохимических реакций; основные теории гомогенного, гетерогенного и ферментативного катализа;</li> <li>- основы теории переноса тепла и массы; принципы физического моделирования химико-технологических процессов;</li> <li>- основные уравнения движения жидкостей; основы теории тепло- и массопередачи, типовые процессы и аппараты химической технологии.</li> </ul>
	Умеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- переходить от языка изложения основных положений фундаментальных дисциплин к доминирующему в теоретических основах химической технологии языку сплошных сред и обратно;</li> <li>-применять полученные знания при выполнении практических заданий, расчетов, осваивать вопросы, выносимые на самостоятельное изучение;</li> <li>- определять характер движения жидкостей и газов; характеристики процессов тепло- и массопередачи; рассчитывать параметры, выбирать аппаратуру для конкретного химико-технологического процесса;</li> <li>- проводить расчеты с использованием основных соотношений термодинамики поверхностных явлений и расчеты основных характеристик дисперсных систем;</li> <li>- составлять кинетические уравнения.</li> </ul>
	Владеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основами математического аппарата применяемого для описания макрокинетики химических реакций, навыками проведения теоретического исследования при диффузионном режиме химических процессов;</li> <li>- навыками выполнять расчеты химико-технологических процессов с использованием математических моделей, моделирующих систем и современных прикладных программ с учетом макрокинетики.</li> </ul>
<p>ОПК-3</p> <p>готовностью использовать знания о строении вещества, природе химической</p>	Знает	<p>методы построения эмпирических (статистических) и физико-химических (теоретических) моделей химико-технологических процессов; методы идентификации математических описаний технологических процессов на основе экспериментальных данных</p>

связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире	Умеет	применять методы вычислительной математики и математической статистики для решения конкретных задач расчета, проектирования, моделирования, идентификации и оптимизации процессов химической технологии
	Владеет	методами математической статистики для обработки результатов активных и пассивных экспериментов, пакетами прикладных программ для моделирования химико-технологических процессов; методами анализа эффективности работы химических производств
ПК-12 способностью рассчитывать нормативы материальных затрат сырья, материалов, реагентов и катализаторов, используемых в производстве продукции	Знает	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основные характеристики технологического процесса в соответствии с регламентом;</li> <li>- свойства сырья, материалов, реагентов, катализаторов и продукции, нормативы их качества;</li> <li>- физико-химические закономерности технологического процесса;</li> </ul>
	Умеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- анализировать свойства сырья и продукции;</li> <li>- оценивать эффективность действия катализаторов;</li> </ul>
	Владеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками измерения характеристик основных параметров технологического процесса и оценивать их соответствие требуемым нормативам;</li> <li>- навыками статистической оценки параметров технологического процесса;</li> </ul>
ПК-22 готовностью использовать знания основных физических теорий для решения возникающих физических задач, самостоятельного приобретения физических знаний, для понимания принципов работы приборов и устройств, в том числе выходящих за пределы компетентности конкретного направления	Знает	<ul style="list-style-type: none"> <li>- процессы, протекающие на конкретных технологических линиях;</li> <li>- масштаб и структуру химических и физических процессов основных химических производств, их аппаратное оформление;</li> <li>- уровень материальных, энергетических и трудовых затрат и ресурсов для производства основных химических продуктов.</li> </ul>
	Умеет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- определять характеристики основных параметров технологического процесса и оценивать их соответствие нормативам;</li> <li>- обоснованно выбирать приборы и оборудование для измерения основных параметров технологического процесса.</li> </ul>
	Владеет	<p>способностью принимать решения по безопасному управлению технологическим процессом с целью обеспечения качества продукции;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методами управления и регулирования химико-технологических процессов, эффективности химического превращения сырья и полупродуктов в конечные продукты.</li> </ul>

№	Контролируемые	Коды и этапы	Оценочные средства
---	----------------	--------------	--------------------

п/п	модули/ разделы / темы дисциплины	формирования компетенций		текущий контроль	промежуточная аттестация
1	МОДУЛЬ 1. Физико- химические закономерности химических процессов	ОПК-1	Знает	Отчет по лабораторной работе № 1 (ПР-6)	Контрольная работа № 1 (ПР- 1) Вопросы к экз. №1-15
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 1 (ПР-6) Домашние зад. № 1 (ПР-11)	
			Владеет		
		ОПК-3	Знает	Отчет по лабораторной работе № 2 (ПР-6)	
			Умеет		
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 2 (ПР-6) Домашние задания № 3 (ПР-11)	
2	МОДУЛЬ 2. Гетерогенные и гетерогенно- каталитические процессы и реакторы	ОПК-3	Знает	Отчет по лабораторной работе № 3 (ПР-6)	Контрольная работа № 2 (ПР- 1) Вопросы к экз. № 16-32
			Умеет	Отчет по лабораторной работе № 3 (ПР-6) Домашние зад. № 4 (ПР-11)	
			Владеет		
		ПК-12	Знает	Отчет по лабораторной работе № 4 (ПР-6) Домашние зад. № 5 (ПР-11)	
			Умеет		
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 5 (ПР-6) Домашние зад. № 6 (ПР-11)	
3	МОДУЛЬ 3. Реакторы идеального смешения и	ОПК-1	Знает	Отчет по лабораторной работе № 5 (ПР-6)	Контрольная работа № 2 (ПР- 2) Вопросы к экз.
Умеет					

	вытеснения		Владеет	Отчет по лабораторной работе № 6 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	№33-39
		ПК-22	Знает	Отчет по лабораторной работе № 6 (ПР-6)	
			Умеет		
			Владеет	Отчет по лабораторной работе № 7 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
		ОПК-3	Знает	Отчет по лабораторной работе № 7 (ПР-6) Домашние зад. № 7 (ПР-11)	
			Умеет		
			Владеет	Домашние зад. № 8 (ПР-11)	

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	критерии	показатели
ОПК-1 способностью использовать математические и естественнонаучные и инженерные знания для решения задач своей профессиональной деятельности	знает (пороговый уровень)	Знание основных понятий, соотношений и способов теоретического описания химических процессов и макрокинетики химических реакций; - начала термодинамики и основные уравнения химической термодинамики; методы термодинамического описания химических и фазовых равновесий в многокомпонентных системах; -уравнения формальной кинетики и кинетики сложных, цепных, гетероген-	Способность описать основные понятия, соотношения и способы теоретического описания химических процессов и макрокинетики химических реакций; начала термодинамики и основные уравнения химической термодинамики; методы термодинамического описания химических и фазовых равновесий в многокомпонентных системах; уравнения формальной кинетики и кинетики сложных,

		<p>ных и фотохимических реакций; основные теории гомогенного, гетерогенного и ферментативного катализа;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основы теории переноса тепла и массы; принципы физического моделирования химико-технологических процессов;</li> <li>- основные уравнения движения жидкостей; основы теории тепло- и массопередачи, типовые процессы и аппараты химической технологии.</li> </ul>	<p>гетерогенного и ферментативного катализа; основ теории переноса тепла и массы; принципы физического моделирования химико-технологических процессов; основных уравнений движения жидкостей; основы теории тепло- и массопередачи, типовые процессы и аппараты химической технологии.</p>	<p>цепных, гетерогенных и фотохимических реакций; основные теории гомогенного, гетерогенного и ферментативного катализа;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>основы теории переноса тепла и массы; принципы физического моделирования химико-технологических процессов;</li> <li>основные уравнения движения жидкостей; основы теории тепло- и массопередачи, типовые процессы и аппараты химической технологии..</li> </ul>
	<p>умеет (продвинутой)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- переходить от языка изложения основных положений фундаментальных дисциплин к доминирующему в теоретических основах химической технологии языку сплошных сред и обратно;</li> <li>- применять полученные знания при выполнении практических заданий, расчетов, осваивать вопросы, выносимые на самостоятельное изучение;</li> <li>- определять характер движения жидкостей и газов; характеристики процессов тепло- и массопередачи; рассчитывать параметры, выбирать аппаратуру для конкретного химико-технологического процесса;</li> <li>- проводить расчеты с использованием основных соотношений термодинамики поверхностных явлений и расчеты основных характеристик дис-</li> </ul>	<p>Умеет переходить от языка изложения основных положений фундаментальных дисциплин к доминирующему в теоретических основах химической технологии языку сплошных сред и обратно;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>применять полученные знания при выполнении практических заданий, расчетов, осваивать вопросы, выносимые на самостоятельное изучение;</li> <li>определять характер движения жидкостей и газов; характеристики процессов тепло- и массопередачи; рассчитывать параметры, выбирать аппаратуру для конкретного химико-технологического процесса;</li> <li>проводить расчеты с использованием основных соотношений термодинамики поверхностных явлений и расчеты основных характеристик дисперсных систем;</li> <li>составлять кинетические уравнения..</li> </ul>	<p>Способность - переходить от языка изложения основных положений фундаментальных дисциплин к доминирующему в теоретических основах химической технологии языку сплошных сред и обратно; применять полученные знания при выполнении практических заданий, расчетов, осваивать вопросы, выносимые на самостоятельное изучение; определять характер движения жидкостей и газов; характеристики процессов тепло- и массопередачи; рассчитывать параметры, выбирать аппаратуру для конкретного химико-технологического процесса; проводить расчеты с использованием основных соотношений термодинамики поверхностных явлений и расчеты основных характеристик дисперсных систем; составлять кинетические уравнения..</p>

		персных систем; - составлять кинетические уравнения.		
	владеет (высокий)	- основами математического аппарата применяемого для описания макрокинетики химических реакций, навыками проведения теоретического исследования при диффузионном режиме химических процессов; - навыками выполнять расчеты химико-технологических процессов с использованием математических моделей, моделирующих систем и современных прикладных программ с учетом макрокинетики.	Владеет основами математического аппарата применяемого для описания макрокинетики химических реакций, навыками проведения теоретического исследования при диффузионном режиме химических процессов; навыками выполнять расчеты химико-технологических процессов с использованием математических моделей, моделирующих систем и современных прикладных программ с учетом макрокинетики.	Способность использовать основы математического аппарата применяемого для описания макрокинетики химических реакций, провести теоретическое исследование при диффузионном режиме химических процессов; выполнять расчеты химико-технологических процессов с использованием математических моделей, моделирующих систем и современных прикладных программ с учетом макрокинетики.
ОПК-3 готовностью использовать знания о строении вещества, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире	знает (пороговый уровень)	Методы построения эмпирических (статистических) и физико-химических (теоретических) моделей химико-технологических процессов; методы идентификации математических описаний технологических процессов на основе экспериментальных данных.	Знание методов построения эмпирических (статистических) и физико-химических (теоретических) моделей химико-технологических процессов; методов идентификации математических описаний технологических процессов на основе экспериментальных данных.	Способность описать модели.
	умеет (продвинутый)	Применять методы вычислительной математики и математической статистики для решения конкретных задач расчета, проектирования, моделирования, иденти-	Умеет применять методы вычислительной математики и математической статистики для решения конкретных задач расчета, проектирования, моделирования, иденти-	Способность применять методы вычислительной математики и математической статистики для решения конкретных задач расчета, проектирования, моде-

		лирования, идентификации и оптимизации процессов химической технологии.	фикации и оптимизации процессов химической технологии.	лирования, идентификации и оптимизации процессов химической технологии.
	владеет (высокий)	методами математической статистики для обработки результатов активных и пассивных экспериментов, пакетами прикладных программ для моделирования химико-технологических процессов; методами анализа эффективности работы химических производств	владеет методами математической статистики для обработки результатов активных и пассивных экспериментов, пакетами прикладных программ для моделирования химико-технологических процессов; методами анализа эффективности работы химических производств	способность использовать методы математической статистики для обработки результатов активных и пассивных экспериментов, пакеты прикладных программ для моделирования химико-технологических процессов; методы анализа эффективности работы химических производств
ПК-12 способностью рассчитывать нормативы материальных затрат сырья, материалов, реагентов и катализаторов, используемых в производстве продукции	знает (пороговый уровень)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основные характеристики технологического процесса в соответствии с регламентом;</li> <li>- свойства сырья, материалов, реагентов, катализаторов и продукции, нормативы их качества;</li> <li>- физико-химические закономерности технологического процесса;</li> </ul>	Знание масштаба и структуры химических и физических процессов основных химических производств, их аппаратурное оформление;	Способность оценивать масштаб и структуру химических и физических процессов основных химических производств, их аппаратурное оформление;
	умеет (продвинутый)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- анализировать свойства сырья и продукции;</li> <li>- оценивать эффективность действия катализаторов;</li> </ul>	Умение использовать полученные знания для анализа современного состояния химических производств анализировать необходимость созда-	Способность использовать полученные знания для анализа современного состояния химических производств анализировать необходимость создания инновационных хи-

			ния инновационных химико-технологических процессов	мико-технологических процессов.
	владеет (высокий)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками измерения характеристик основных параметров технологического процесса и оценивать их соответствие требуемым нормативам;</li> <li>- навыками статистической оценки параметров технологического процесса;</li> </ul>	Навыками управления и регулирования химико-технологических процессов;	Способность использовать методы управления и регулирования химико-технологических процессов;
ПК-22 готовностью использовать знания основных физических теорий для решения возникающих физических задач, самостоятельного приобретения физических знаний, для понимания принципов работы приборов и устройств, в том числе выходящих за пределы компетентности конкретного направления	знает (пороговый уровень)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- процессы, протекающие на конкретных технологических линиях;</li> <li>- масштаб и структуру химических и физических процессов основных химических производств, их аппаратное оформление;</li> <li>- уровень материальных, энергетических и трудовых затрат и ресурсов для производства основных химических продуктов.</li> </ul>	знание уровня материальных, энергетических и трудовых затрат и ресурсов для производства основных химических продуктов; современные тенденции в развитии химической технологии;	Способность использовать уровни материальных, энергетических и трудовых затрат и ресурсов для производства основных химических продуктов; современные тенденции в развитии химической технологии
	умеет (продвинутый)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- определять характеристики основных параметров технологического процесса и оценивать их соответствие нормативам;</li> <li>- обоснованно выбирать приборы и оборудование для измерения основных параметров технологического процесса.</li> </ul>	навыками использования многообразных методов химического превращения сырья и полупродуктов в конечные продукты;	способность ориентироваться в современных тенденциях развития химической технологии
	владеет (высокий)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- способностью принимать решения по безопасному управлению технологическим процессом с целью обеспечения качества продукции;</li> <li>- методами управления и регулиро-</li> </ul>	Навыками управления многообразием химико-технологических способов и приёмов воздействия на химические системы	методы химического превращения сырья и полупродуктов в конечные продукты; химико-технологические способы и приёмы воздействия на химические системы

		вания химико-технологических процессов, эффективности химического превращения сырья и полупродуктов в конечные продукты.		
--	--	--	--	--

## Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины

### Оценочные средства для промежуточной аттестации

#### Вопросы к экзамену

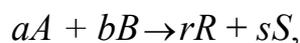
1. Из каких основных стадий состоит химико-технологический процесс? В каких стадиях химико-технологического процесса участвуют химические реакции?

2. Что такое химический процесс? Почему химический процесс как единственный процесс химической технологии сложнее по сравнению с тепловыми и массообменными процессами?

3. Какие технологические критерии эффективности химико-технологического процесса вы знаете? Дайте их определения.

Каковы пределы изменения степени превращения, выхода продукта, селективности?

4. Выведите уравнение связи между степенями превращения двух реагентов, вступающих в реакцию



если известно, что для проведения реакции взято  $n_{A,0}$  моль реагента  $A$  и  $n_{B,0}$  моль реагента  $B$ .

5. В химической реакции участвуют два реагента  $A$  и  $B$ , причем на каждый моль реагента  $A$  взято по 2 моль реагента  $B$ . В каком случае будет справедливо утверждение, что степень превращения  $x_A$  реагента  $A$  больше степени превращения  $x_B$  реагента  $B$ ?

6. В чем различия между действительной и равновесной степенями превращения реагента?

7. С какой целью при проведении химических процессов в промышленных условиях один из реагентов часто берут в избытке по отношению к сте-

хиометрии реакции? Каковы пути использования реагента, взятого в избытке и не вступившего в реакцию?

8. Выведите уравнение связи между выходом продукта и степенью превращения одного из реагентов для обратимой химической реакции, не сопровождающейся побочными взаимодействиями.

9. В чем различие между полной (интегральной) и мгновенной (дифференциальной) селективностями?

10. Что называется производительностью, мощностью, интенсивностью?

11. Как связаны между собой:

а) производительность и степень превращения реагента;

б) производительность и выход целевого продукта?

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

13. Как определить направленность химической реакции? Как, сравнивая значения энергии Гиббса  $\Delta G$  для различных реакций, определить, какая из них является спонтанной (самопроизвольной)?

14. Что характеризует химическое равновесие?

15. Сформулируйте принцип Ле Шателье. Как он помогает предсказать влияние изменения температуры и давления на состояние равновесия химической реакции?

16. Используя принцип Ле Шателье, проанализируйте для приведенных реакций все возможные способы смещения равновесия вправо:



17. Почему можно исключить из выражения для константы равновесия концентрации компонентов, являющихся чистыми твердыми веществами или жидкостями?

18. Чем различаются определения скорости гомогенной и гетерогенной химических реакций?

19. Как взаимосвязаны между собой реальные скорости образования или расходования отдельных участников реакции  $aA + bB \rightarrow rR + sS$ ?

20. В чем заключается различие между микрокинетикой и макрокинетикой?

21. Что такое частный порядок реакции по компоненту  $J$ ? Как взаимосвязаны частные порядки по разным компонентам и общий порядок реакции?

22. Какие реакции называют простыми, формально простыми, сложными?
23. Как составляют кинетические уравнения простых реакций?
24. Как составляют кинетические уравнения сложных реакций:
- а) с известным механизмом реакции;
  - б) с неизвестным механизмом реакции?
25. От каких микрокинетических факторов зависит скорость химической реакции?
26. В гомогенной химической реакции участвуют два реагента  $A$  и  $B$ . Реакция имеет первый порядок по реагенту  $A$  и второй порядок по реагенту  $B$ . Увеличение концентрации какого реагента даст больший эффект увеличения скорости реакции?
27. Запишите уравнение Аррениуса в дифференциальной, интегральной и логарифмической формах. В чем суть уравнения Аррениуса?
28. Процессы переноса в каталитических реакциях. Области протекания реакции. Понятие лимитирующей стадии. Внешнедиффузионная область. Общие закономерности. Скорость процесса во внешнедиффузионной области. Тепловые режимы. Влияние различных факторов. Процесс на поверхности непористого катализатора.
29. Внутренне-диффузионная область. Внутренняя диффузия. Молекулярная диффузия. Кнудсеновская диффузия. Пористая структура катализаторов, модели их пористой структуры. Выражения скорости реакции. Схема и математическая модель процесса в пористом зерне катализатора. Кинетические уравнения, метод решения. Перенос в гранулах и фактор эффективности (степень использования внутренней поверхности катализатора). Модуль Зельдовича-Тиле. Эффекты теплопереноса. Влияние внутренне-диффузионных факторов на скорость процессов.
30. Коэффициент диффузии. Теоретические критерии. Критерии влияния внешней диффузии. Критерии влияния внутренней диффузии. Критерии теплопереноса. Внешняя диффузия.
31. Кажущаяся энергия активации гетерогенных реакций.
32. Гетерогенные процессы. Модели гетерогенного процесса («сжимающаяся сфера», «сжимающееся ядро»). Наблюдаемая скорость гетерогенного процесса, время полного превращения. Что такое «режим процесса» и «лимитирующая стадия»? Характерные признаки лимитирующей стадии, способы ее определения. Определяющий параметр для каждой лимитирующей стадии.
33. Типы, классификация химических реакторов и проблемы их разработки.
34. Общая стратегия разработки каталитических реакторов.

35. Подходы к математическому моделированию каталитических реакторов. Основные вопросы, исследуемые на основе математического моделирования.

36. Уравнения баланса массы и энергии.

37. Стратифицированная модель каталитического реактора.

38. Изотермический процесс в химическом реакторе. Проточный реактор идеального смешения (РИС-н). Реактор идеального вытеснения (РИВ). Реактор идеального смешения периодического действия (РИС-п).

39. Неизотермический процесс в химическом реакторе. Проточный реактор идеального смешения (РИС-н). Реактор идеального вытеснения (РИВ). Реактор идеального смешения периодического действия (РИС-п). Устойчивость стационарных режимов химических реакторов.

### **Критерии оценки вопросов к экзамену**

#### *Отметка "Отлично"*

1. Глубокое и прочное усвоение материала, все предоставленные задания выполняются правильно.

2. Ответ сформирован полно, правильно обоснован ход суждения.

3. Материал изложен в определенной логической последовательности, литературным языком.

4. Ответ самостоятельный.

#### *Отметка "Хорошо"*

1, 2, 3 – аналогично отметке "Отлично".

4. Допущены 1-2 несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя.

#### *Отметка "Удовлетворительно"*

1. Знание только основного материала, но не деталей.

2. Допущены ошибки и неточности в ответах.

3. Ответ неполный, хотя и соответствует требуемой глубине, имеет нарушения логической последовательности.

#### *Отметка "Неудовлетворительно"*

1. Незнание или непонимание наиболее существенной части учебного материала.

2. Не выполнена значительная часть задания, имеются существенные ошибки.

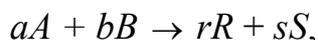
### **Оценочные средства для текущей аттестации**

#### **Вопросы и задания к контрольной работе №1**

1. Какие технологические критерии эффективности химико-технологического процесса вы знаете? Дайте их определения.

2. Каковы пределы изменения степени превращения, выхода продукта, селективности?

3. Выведите уравнение связи между степенями превращения двух реагентов, вступающих в реакцию



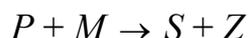
если известно, что для проведения реакции взято  $n_{A,0}$  моль реагента  $A$  и  $n_{B,0}$  моль реагента  $B$ .

4. В химической реакции участвуют два реагента  $A$  и  $B$ , причем на каждый моль реагента  $A$  взято по 2 моль реагента  $B$ . В каком случае будет справедливо утверждение, что степень превращения  $x_A$  реагента  $A$  больше степени превращения  $x_B$  реагента  $B$ ?

5. Определите состав смеси ( $c_A, c_B, c_R, c_S$ ) и степень превращения  $J_{C_B}$  для реакции  $A + 2B \rightarrow 2R + S$ , если  $x_A = 0,6$ ,  $c_{A,0} = 1$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{B,0} = 1,5$  кмоль/м<sup>3</sup>.

6. Выведите уравнение связи между выходом продукта и степенью превращения одного из реагентов для обратимой химической реакции, не сопровождающейся побочными взаимодействиями.

7. Рассчитайте выход продукта  $P$ , если известно, что при проведении последовательных реакций

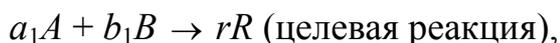


получено 12 моль продукта  $P$ , 4 моль продукта  $S$ , а для проведения реакций было взято по 20 моль реагентов  $A$  и  $B$ .

8. Выведите уравнение взаимосвязи между выходом целевого продукта  $R$ , степенью превращения реагента  $A$  и полной селективностью  $S$  при проведении двух необратимых последовательных реакций



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



10. Рассчитайте полную селективность, если при проведении последовательных реакций

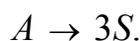
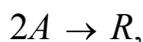


получено 6 моль продукта  $R$  и 2,5 моль продукта  $S$ .

11. Протекают последовательные реакции  $A \rightarrow 2R$  и  $R \rightarrow 3S$ , целевым продуктом которых является вещество  $R$ . Определите выход продукта  $R$ , степень превращения  $x_A$  и полную селективность  $\phi$ , если известен конечный состав реакционной смеси:  $c_{A,f} = 1$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{R,f} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{S,f} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>.

12. Определите выход продукта  $R$  и степень превращения  $x_A$  реагента  $A$ , если обратимая реакция  $A \rightarrow 2R$  протекает при условиях, когда равновесная степень превращения  $x_{A,e} = 0,75$ , а отношение концентраций продукта и реагента после окончания реакции  $c_R : c_A = 1$ .

13. Протекают параллельные реакции



Определите выход продукта  $R$ , степень превращения  $x_A$  реагента  $A$  и полную селективность  $S$ , если на выходе из реактора  $c_{A,f} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{R,f} = 3$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{S,f} = 3,5$  кмоль/м<sup>3</sup>.

14. Что называется производительностью, мощностью, интенсивностью?

15. Как связаны между собой:

а) производительность и степень превращения реагента;

б) производительность и выход целевого продукта?

16. Как определить направленность химической реакции? Как, сравнивая значения энергии Гиббса  $\Delta G$  для различных реакций, определить, какая из них является спонтанной (самопроизвольной)?

17. Вычислите величины  $K_c$ ,  $K_N$ ,  $K_n$  для равновесной реакции



если при температуре 580 °С найдена  $K_p = 0,20$ , общее давление  $p = 0,005$  МПа.

18. Используя принцип Ле Шателье, проанализируйте для приведенных реакций все возможные способы смещения равновесия вправо:



19. Выведите уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента  $A$  по известной величине  $K_c$  (для реакции  $2A \rightleftharpoons R$ ).

20. Выведите уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента  $A$  по известным значениям  $K_p$  и давления  $p$  в системе для реакции  $A + B \rightleftharpoons R$ .

21. Выведите уравнение для расчета равновесного состава участников реакции синтеза аммиака по известным значениям  $K_p$ , и давления  $p$  в системе.

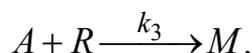
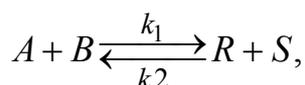
22. Рассчитайте константу равновесия для реакции  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$ , если известно, что для  $\text{CO}_2$   $\Delta G_{298}^0 = -394572$  и для  $\text{CO}$   $\Delta G_{298}^0 = -137334$  Дж/моль.

23. Найдите константу равновесия при температурах 500 и 2000 К для реакции  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$ , если  $\Delta G_{500}^0 = 20,2$  кДж/моль и  $\Delta G_{2000}^0 = 25,3$  кДж/моль.

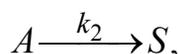
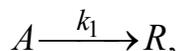
24. Как взаимосвязаны между собой реальные скорости образования или расходования отдельных участников реакции  $aA + bB \rightarrow rR + sS$ ?

25. Что такое частный порядок реакции по компоненту  $n$ ? Как взаимосвязаны частные порядки по разным компонентам и общий порядок

26. Используя правило составления кинетических уравнений сложных реакций, запишите кинетические уравнения для расчета скорости по веществам  $A$ ,  $B$ ,  $R$  и  $M$  для сложной реакции

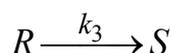
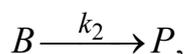
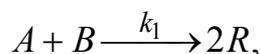


27. При постоянной температуре протекают две параллельные реакции:



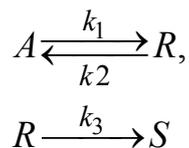
характеризующиеся значениями констант скорости  $k_1 = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $k_2 = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Перед началом реакции  $c_{A,0} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{R,0} = c_{S,0} = 0$ . Определите значения скорости химической реакции по исходному реагенту  $A$  ( $w > rA$ ) и продукту  $S$  в момент времени, когда  $c_R = 0,05$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_S = 0,5$  кмоль/м<sup>3</sup>.

28. Протекает сложная реакция



при температуре, когда константы скоростей отдельных элементарных реакций имеют следующие значения:  $k_1 = 0,02 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$ ,  $k_2 = 0,0015 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_3 = 0,0028 \text{ с}^{-1}$ . Начальный состав реакционной смеси:  $c_{A,0} = 0,1$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{B,0} = 0,3$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{R,0} = c_{S,0} = c_{P,0} = 0$ . В реакторе установились концентрации продуктов:  $c_R = 0,028$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_P = 0,05$  кмоль/м<sup>3</sup>; степень превращения исходного реагента  $x_A = 0,2$ . Определите значения скоростей химической реакции по веществам  $R$  и  $P$ .

29. Протекает сложная реакция



при температуре, когда константы скоростей отдельных элементарных реакций имеют следующие значения:  $k_1 = 0,0028 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_2 = 0,051 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_3 = 0,0032 \text{ с}^{-1}$ . Начальная концентрация исходного реагента  $c_{A,0} = 1,65 \text{ кмоль/м}^3$ ; фактическая степень превращения исходного реагента  $x_A$  составляет 30 % от равновесной степени превращения  $x_{A,e}$ ; концентрация продукта  $R c_R = 0,15 \text{ кмоль/м}^3$ . Определите значение скорости реакции по продукту  $R$  ( $w_{rR}$ ).

30. В гомогенной химической реакции участвуют два реагента  $A$  и  $B$ . Реакция имеет первый порядок по реагенту  $A$  и второй порядок по реагенту  $B$ . Увеличение концентрации какого реагента даст больший эффект увеличения скорости реакции?

31. Выведите уравнение зависимости дифференциальной селективности от концентрации реагента  $A$  для параллельных реакций, имеющих разный порядок по реагенту  $A$ .

32. Вещества  $A$  и  $B$  участвуют в двух параллельных реакциях, причем частный порядок по реагенту  $A$  выше в целевой реакции, а частный порядок по реагенту  $B$  выше в побочной реакции. Какие можно сделать рекомендации по изменению концентраций реагентов для обеспечения высокой дифференциальной селективности? Как можно эти рекомендации выполнить при технологическом оформлении процесса?

33. Запишите уравнение Аррениуса в дифференциальной, интегральной и логарифмической формах. В чем суть уравнения Аррениуса?

34. Определите энергию активации реакции, если при изменении температуры с 450 до 500 °С ее скорость возрастет в 2,73 раза.

35. При температуре 748 К константа скорости реакции составляет  $3,2 \cdot 10^5 \text{ ч}^{-1}$ . Определите константу скорости этой реакции при температуре 793 К, если ее энергия активации  $E = 87,9 \text{ кДж/моль}$ .

36. При проведении кинетических экспериментов определены следующие значения константы скорости химической реакции ( $\text{м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{ч})$ ) при различных температурах (К):

$T$  298 323 348 373 398  $\text{м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{ч})$ .

$K$  0,51 0,82 1,35 1,92 2,62 К.

Определите энергию активации реакции.

37. Для реакции  $n$ -го порядка



экспериментально получена зависимость концентрации реагента (кмоль/м<sup>3</sup>) от времени проведения реакции (мин) в периодическом реакторе при постоянной температуре:

$\tau$ , мин 0 1 2 3 4 5;

$c_A$ , кмоль/м<sup>3</sup> 2,00 0,96 0,63 0,47 0,39 0,31.

Определите порядок реакции и вычислите константу скорости.

38. Почему эффективность повышения температуры, как средства относительного увеличения скорости реакции, выше при низких температурах, чем при высоких температурах?

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

40. Две параллельные реакции

$a_1A + b_1B \rightarrow rR + sS$  (целевая реакция);

$a_2A + b_2B \rightarrow yY + zZ$  (побочная реакция)

характеризуются кинетическими уравнениями

$$w_{rA, \text{цел}} = k_1 c_A^{0,8} c_B^{1,54}; \quad w_{rA, \text{поб}} = k_2 c_A^{1,5} c_B^{0,25}$$

и энергиями активации  $E_1 = 45$  кДж/моль,  $E_2 = 65$  кДж/моль.

Проанализируйте зависимость дифференциальной селективности для такой системы реакций:

а) от концентрации реагента  $A$ ;

б) от концентрации реагента  $B$ ;

в) от температуры.

Какие можно дать рекомендации по выбору технологического режима для этого процесса на основе проведенного анализа?

41. Две параллельные реакции характеризуются одинаковым порядком и различными значениями энергии активации: энергия активации целевой реакции равна 84 кДж/моль, энергия активации побочной реакции – 45 кДж/моль. Как повлияет увеличение температуры на дифференциальную селективность? Во сколько раз изменится дифференциальная селективность  $\phi'$  при увеличении температуры проведения реакции от 100 до 500 °С?

### Вопросы и задания к контрольной работе №2

1. В чем заключается главная кинетическая особенность гетерогенных химических процессов?

2. Какие кинетические модели обычно используют для описания гетерогенных процессов в системах «газ – твердое», «газ – жидкость»?

3. Какой смысл вкладывается в понятия «кинетическая область гетерогенного процесса» и «диффузионная область»?

4. Как увеличить коэффициент массоотдачи на стадии внешней диффузии?

5. Выведите уравнение для расчета константы скорости гетерогенного процесса в системе «газ – твердое», включающего химическую реакцию первого порядка.

6. Изобразите профиль изменения концентрации газообразного реагента, при протекании гетерогенного процесса, описываемого моделью с фронтальным перемещением зоны реакции в случаях:

а) когда гетерогенный процесс лимитируется внешней диффузией;

б) когда гетерогенный процесс лимитируется внутренней диффузией;

в) когда гетерогенный процесс лимитируется химической реакцией;

г) когда гетерогенный процесс не имеет лимитирующей стадии (протекает в переходной области).

7. Сформулируйте основные свойства лимитирующей стадии.

8. Как определить лимитирующую стадию гетерогенного процесса, экспериментально изучая влияние температуры на скорость образования продуктов в ходе этого процесса?

9. Как определить лимитирующую стадию гетерогенного процесса в системе «газ – твердое», используя теоретические зависимости между временем пребывания в реакторе и степенью превращения твердой фазы для различных областей протекания гетерогенного процесса?

10. В чем заключаются различия в расчете реакторов для проведения гетерогенных процессов в системе «газ – твердое» в случаях, когда твердая фаза состоит из частиц одного размера и когда она характеризуется каким-то распределением частиц по размерам?

11. Какая величина называется коэффициентом ускорения абсорбции? Почему можно говорить об ускорении абсорбции, если в жидкой фазе протекает химическая реакция?

12. Сравните достоинства и недостатки пленочной модели и моделей обновления поверхности, используемых при описании газожидкостных реакций.

13. Перечислите основные технологические характеристики твердых катализаторов и дайте их определения.

14. Какая кинетическая модель гетерогенных процессов подходит для описания каталитической реакции на твердом пористом катализаторе?

15. Какие отрицательные последствия может вызвать протекание каталитической реакции на твердом катализаторе во внешне диффузионной области?

16. Что такое коэффициент эффективности использования поверхности катализатора?

### **Вопросы и задания к контрольной работе № 3**

1. В чем заключается метод моделирования?
2. Сформулируйте основные требования, предъявляемые к математической модели химического реактора.
3. В чем заключается иерархический принцип моделирования химических процессов и реакторов?
4. Какие признаки могут быть положены в основу классификации химических реакторов?
5. Каковы различия в условиях перемешивания в проточных реакторах смешения и вытеснения?
6. Какой режим работы химического реактора называется стационарным? Возможен ли стационарный режим в периодическом реакторе? В полунепрерывном реакторе?
7. Каким условиям должен удовлетворять элементарный объем, для которого составляются балансовые уравнения?
8. Каким должен быть элементарный промежуток времени при составлении балансовых уравнений для реакторов, работающих в стационарном режиме? В нестационарном режиме?
9. Почему именно балансовые уравнения (уравнения материального и энергетического балансов) составляют основу математической модели химического реактора?
10. Какими математическими операторами описывается перенос импульса и массоперенос?
11. Почему при стационарном режиме работы химического реактора в нем не происходит накопления вещества и теплоты?
12. Сформулируйте допущения модели идеального смешения.
13. Каковы основные причины отклонения от идеальности в реальных реакторах смешения?
14. Почему при составлении балансовых уравнений для реактора идеального смешения в качестве элементарного объема может быть принят полный объем реактора?
15. Составьте уравнение материального баланса для периодического реактора идеального смешения.
16. Проанализируйте основные недостатки и достоинства реактора периодического действия. В каких производствах чаще встречаются такие реакторы?

17. Составьте уравнение материального баланса для стационарного проточного реактора идеального смешения.

18. В чем заключается различие между действительным и средним временем пребывания реагентов в проточном реакторе? Для какого типа проточных реакторов действительное и среднее время пребывания совпадают?

19. Определите объем проточного реактора идеального смешения, необходимый для достижения степени превращения исходного реагента  $x_A = 0,85$  при проведении реакции  $2A \xrightarrow{k} R + S$ , если  $c_{A,0} = 2,5$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $k = 18,2$  м<sup>3</sup>/(кмоль·ч), реагенты подают в реактор с объемным расходом  $v = 1,2$  м<sup>3</sup>/ч.

20. Определите степени превращения реагентов  $A$  и  $B$  на выходе из проточного реактора идеального смешения объемом  $0,5$  м<sup>3</sup> при проведении реакции  $A + B \longrightarrow R + S$ , если  $c_{A,0} = 1,2$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $c_{B,0} = 1,6$  кмоль/м<sup>3</sup>, объемный расход  $v = 5$  м<sup>3</sup>/ч, константа скорости  $k = 12$  м<sup>3</sup>/(кмоль·ч).

21. В проточном реакторе идеального смешения проводят реакцию  $2A \longrightarrow R + S$ , протекающую в газовой фазе при температуре  $800$  К и давлении  $6 \cdot 10^5$  Па. В реактор подают смесь, объемная доля реагента  $A$  в которой составляет  $70$  %, а объемная доля инертного компонента –  $30$  %. Определите среднее время пребывания  $\bar{\tau}$ , необходимое для достижения степени превращения  $x_A = 0,8$ , если константа скорости  $k = 414,7$  м<sup>3</sup>/(кмоль·ч).

22. В проточном реакторе идеального смешения проводят обратимую реакцию  $A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} R$ . Определите объем реактора, необходимый для достижения степени превращения, составляющей  $75$  % равновесной, если объемный расход  $v = 0,01$  м<sup>3</sup>/ч,  $k_1 = 0,18$  ч<sup>-1</sup>,  $k_2 = 0,24$  ч<sup>-1</sup>.

23. В проточном реакторе идеального смешения при температуре  $330$  К проводят реакцию второго порядка  $A + B \longrightarrow R + S$ . В реактор подают реагенты с объемным расходом  $v = 2$  м<sup>3</sup>/ч и начальными концентрациями  $c_{A,0} = c_{B,0} = 1$  кмоль/м<sup>3</sup>. Константа скорости реакции задана в виде выражения

$$k = 7 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{43000}{RT}\right).$$

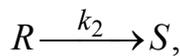
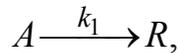
Определите объем реактора, необходимый для достижения степени превращения  $x_A = 0,8$ .

24. В каких случаях появляется необходимость численного (например, графического) решения уравнения материального баланса проточного реактора идеального смешения для определения концентрации реагента на выходе из реактора? В чем суть такого решения?

25. Определите концентрацию реагента  $A$  на выходе из проточного реактора идеального смешения объемом  $1,2$  м<sup>3</sup>, если для проведения реакции  $A$

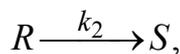
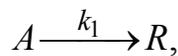
—→  $R + S$ , кинетика которой описывается уравнением  $w_{rA} = 3c_A^{1,5}$ , подают реагент  $A$  с начальной концентрацией  $c_{A,0} = 1,5$  кмоль/м<sup>3</sup> и объемным расходом  $v = 3$  м<sup>3</sup>/ч.

26. Определите максимально возможную концентрацию промежуточного продукта  $R$  при проведении в изотермическом реакторе идеального смешения последовательных реакций



если  $k_1 = 0,14$  ч<sup>-1</sup>,  $k_2 = 0,2$  ч<sup>-1</sup>,  $c_{A,0} = 0,7$  кмоль/м<sup>3</sup>.

27. Определите максимально возможную производительность по промежуточному продукту  $R$  при проведении в изотермическом реакторе идеального смешения последовательных реакций



если  $k_1 = 0,4$  ч<sup>-1</sup>,  $k_2 = 0,15$  ч<sup>-1</sup>, объемный расход  $v = 0,5$  м<sup>3</sup>/ч,  $c_{A,0} = 0,7$  кмоль/м<sup>3</sup>.

Какой объем реактора для этого потребуется? Какая селективность будет достигнута?

28. Сформулируйте допущения модели идеального вытеснения. При каких условиях можно приблизиться в реальном реакторе к идеальному вытеснению?

29. Почему при ламинарном течении реакционного потока в проточном реакторе режим идеального вытеснения не может быть достигнут?

30. Составьте уравнение материального баланса реактора идеального вытеснения в дифференциальной форме. Какие явления переноса (импульса, теплоты, массы) отражены в этом уравнении?

31. Определите объем реактора идеального вытеснения для проведения реакции  $2A \xrightarrow{k} R + S$ , если  $k = 5$  м<sup>3</sup>/(кмоль·ч),  $c_{A,0} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>, объемный расход  $v = 12$  м<sup>3</sup>/ч, необходимая степень превращения  $x_A = 0,75$ .

32. Определите объем реактора идеального вытеснения для проведения обратимой реакции  $A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} R$  с целью достижения степени превращения, составляющей 70 % равновесной, если  $k_1 = 0,18$  ч<sup>-1</sup>,  $k_2 = 0,24$  ч<sup>-1</sup>, объемный расход  $v = 1$  м<sup>3</sup>/ч.

33. В реакторе идеального вытеснения проводят реакцию  $A + B \longrightarrow R + S$ . Определите производительность по продукту  $R$ , если  $c_{A,0} = c_{B,0} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>, объем реактора  $V = 1,4$  м<sup>3</sup>, объемный расход  $v = 28$  м<sup>3</sup>/ч, константа скорости  $k = 18$  м<sup>3</sup>/(кмоль·ч).

34. Определите степень превращения на выходе из реактора идеального вытеснения объемом  $1 \text{ м}^3$  при проведении реакции,  $A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} R$  если объемный расход  $v = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ , константа скорости прямой реакции  $k_1 = 4,6 \text{ ч}^{-1}$ , константа равновесия  $K_c = 4$ .

35. В реакторе идеального вытеснения проводят реакцию  $A + 2B \longrightarrow R + 2S$ , кинетика, которой описывается уравнением  $w_{rA} = kc_A^{0,25}c_B^{0,75}$ . Определите объем реактора для достижения степени превращения реагента  $x_A = 0,6$ , если  $k_1 = 1,0 \text{ ч}^{-1}$ ,  $c_{B,0} = 0,8 \text{ кмоль/м}^3$ ,  $c_{A,0} = 0,6 \text{ кмоль/м}^3$ , объемный расход  $v = 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

36. Назовите основную причину, по которой для достижения той же степени превращения при одинаковых условиях проведения реакции в проточном реакторе идеального смешения требуется существенно большее время пребывания реакционной смеси, чем в реакторе идеального вытеснения или в периодическом реакторе идеального смешения?

37. Проанализируйте достоинства и недостатки проточного реактора, режим которого близок к идеальному смешению, по сравнению с реактором, режим в котором близок к идеальному вытеснению.

38. В проточном реакторе идеального смешения при проведении реакции первого порядка  $A \rightarrow R$  достигнута степень превращения реагента  $A$   $x_A = 0,8$  при температуре, когда константа скорости  $k = 0,2 \text{ ч}^{-1}$ .

Во сколько раз меньший объем реактора идеального вытеснения требуется для проведения этой же реакции при прочих равных условиях (объемный расход и температура)?

39. В реакторе идеального вытеснения при проведении реакции  $2A \rightarrow R + S$  получена степень превращения  $x_A = 0,75$  при условии, что  $c_{A,0} = 1,2 \text{ кмоль/м}^3$ , среднее время пребывания в реакторе  $\bar{\tau} = 0,5 \text{ ч}$ . Определите, какая степень превращения будет достигнута в реакторе идеального смешения при тех же значениях  $c_{A,0}$  и  $\bar{\tau}$ .

40. Реакция  $A + B \rightarrow R$  описывается кинетическим уравнением второго порядка. При ее проведении в реакторе идеального вытеснения объемом  $V$  достигается степень превращения  $x_A = 0,9$ , если  $c_{B,0} : c_{A,0} = 2$ . Каким должно быть отношение начальных концентраций исходных реагентов, чтобы в реакторе идеального смешения равного объема  $V$  при равном объемном расходе реакционной смеси достигалась та же степень превращения?

41. Сформулируйте основные допущения модели каскада реакторов идеального смешения.

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

43. Определите степень превращения реагента  $A$  при проведении реакции  $A + B \xrightarrow{k} R + S$  в двух последовательно соединенных реакторах идеального смешения равного объема  $V_1 = V_2 = 0,5 \text{ м}^3$ , если  $c_{A,0} = c_{B,0} = 2,2 \text{ кмоль/м}^3$ , объемный расход  $v = 3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $k = 2,5 \text{ м}^3/(\text{кмоль}\cdot\text{ч})$ .

44. Определите производительность по продукту  $R$  при проведении обратимой реакции  $A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} R$  в каскаде из двух реакторов идеального смешения равного объема  $V_1 = V_2 = 0,3 \text{ м}^3$ , если  $c_{A,0} = 1,5 \text{ кмоль/м}^3$ , объемный расход  $v = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $k_1 = 0,32 \text{ ч}^{-1}$ ,  $k_2 = 0,18 \text{ ч}^{-1}$ .

45. В каскаде из двух реакторов идеального смешения проводят реакцию первого порядка  $A \xrightarrow{k} R$ . Какой объем ( $V_1 = V_2$ ) должны иметь секции каскада для достижения степени превращения  $x_A = 0,75$ , если  $k = 2 \text{ ч}^{-1}$ , объемный расход  $v = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ?

46. В каскаде реакторов идеального смешения равного объема ( $V_i = 1 \text{ м}^3$ ) проводят реакцию первого порядка  $A \xrightarrow{k} R$ . Определите число секций каскада для достижения степени превращения  $x_A = 0,9$ , если объемный расход  $v = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $k = 0,32 \text{ ч}^{-1}$ .

47. Определите число секций каскада реакторов идеального смешения равного объема, необходимых для достижения степени превращения  $x_A = 0,65$ , при проведении реакции  $2A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} R + 2S$ , если  $c_{A,0} = 20 \text{ кмоль/м}^3$ ,  $k_1 = 1 \text{ м}^3/(\text{кмоль}\cdot\text{ч})$ ,  $k_2 = 0,8 \text{ м}^3/(\text{кмоль}\cdot\text{ч})$ , среднее время пребывания в каждой секции  $\bar{\tau} = 0,05 \text{ ч}$ .

48. 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 проведении реакции  $A + 2B \rightarrow R + 2S$ , кинетика которой описывается уравнением  $w_{rA} = kc_A^{0,5}c_B^{1,5}$ , если  $k = 2,5 \text{ м}^3/(\text{кмоль}\cdot\text{ч})$ ,  $c_{A,0} = 1 \text{ кмоль/м}^3$ ,  $c_{B,0} = 2 \text{ кмоль/м}^3$ , объемный расход  $v = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

49. В каскаде реакторов идеального смешения проводят реакцию  $A + 2B \xrightarrow{k} R + 2S$  до достижения 80 %-ной степени превращения реагента  $A$ . Определите число секций и суммарный объем каскада реакторов для следующих условий осуществления процесса:  $c_{A,0} = 1 \text{ кмоль/м}^3$ ,  $c_{B,0} = 1 \text{ кмоль/м}^3$ ,  $k = 0,2 \text{ м}^3/(\text{кмоль}\cdot\text{ч})$ , объем каждой секции  $V_i = 1 \text{ м}^3$ , объемный расход  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Определите также объем единичного реактора идеального смешения и объем реактора идеального вытеснения для тех же условий проведения процесса.

50. В чем состоят принципиальные различия в условиях теплообмена для изотермического и адиабатического режимов работы реактора?

51. Составьте систему уравнений материального и теплового балансов для изотермического реактора идеального смешения.

52. Почему нельзя найти аналитическое решение системы уравнений материального и теплового балансов адиабатического реактора идеального смешения, работающего в стационарном режиме, относительно температуры в реакторе и достигаемой в нем степени превращения?

53. Используя графическое решение системы уравнений материального и теплового балансов адиабатического реактора идеального смешения, проанализируйте возможности увеличения достигаемой в реакторе степени превращения в случае проведения в нем:

- а) необратимой реакции;
- б) обратимой эндотермической реакции;
- в) обратимой экзотермической реакции.

54. Найдите графическое решение системы уравнений материального и теплового балансов реактора идеального смешения промежуточного типа при проведении в нем обратимой эндотермической реакции.

55. Составьте алгоритм и схему расчета на ЭВМ изменения во времени температуры в периодическом реакторе идеального смешения с рубашкой обогрева, при проведении в нем необратимой эндотермической реакции первого порядка.

56. Составьте алгоритм и схему расчета на ЭВМ распределения степени превращения по длине реактора идеального вытеснения с промежуточным тепловым режимом, при проведении в нем необратимой экзотермической реакции первого порядка.

57. Какая величина выбирается в качестве критерия оптимизации при разработке оптимального температурного режима? Обоснуйте сделанный выбор.

58. Постройте линию оптимальных температур для проведения реакции  $A \rightarrow R$ , характеризующейся следующими кинетическими параметрами:

$$k_1 = 7 \cdot 10^4 \exp\left(-\frac{40000}{RT}\right) \text{с}^{-1}, \quad k_2 = 1,2 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{52000}{RT}\right) \text{с}^{-1}.$$

59. Как можно построить рабочую линию проведения обратимой экзотермической реакции в последовательно соединенных адиабатических реакторах вытеснения с промежуточным теплоотводом?

### **Критерии оценки вопросов и заданий к контрольной работе**

*Отметка "Отлично"*

1. Ответ показывает прочные знания основных процессов изучаемой предметной области, отличается глубиной и полнотой раскрытия темы.
2. Материал понят и изучен.
3. Материал изложен в определенной логической последовательности, литературным языком.
4. Ответ самостоятельный, аргументированный.

*Отметка "Хорошо"*

- 1, 2, 3– аналогично отметке "Отлично".
4. Допущены 1-2 неточности.

*Отметка "Удовлетворительно"*

1. Учебный материал, в основном, изложен полно, но при этом допущены 1-2 существенные ошибки (например, неумение применять законы и теории к объяснению новых фактов).
2. Ответ неполный, хотя и соответствует требуемой глубине, построен несвязно.

*Отметка "Неудовлетворительно"*

1. Незнание или непонимание большей или наиболее существенной части учебного материала.
2. Допущены существенные ошибки, которые не исправляются после уточняющих вопросов, материал изложен несвязно.