



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

ИНСТИТУТ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

СОГЛАСОВАНО  
Руководитель ОП

(подпись)

Патрушева О.В.  
(Ф.И.О.)



УТВЕРЖДАЮ  
Директор департамента

(подпись)

Капустина А.А.  
(Ф.И.О.)

« 20 » декабря 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Химические реакторы

Направление подготовки 04.03.01 «Химия»

Химия и химическая инженерия (совместно с НЗМУ)

Форма подготовки очная

курс 4 семестр 8

лекции 20 час.

практические занятия не предусмотрены

лабораторные работы 90 час.

всего часов аудиторной нагрузки 110 час.

самостоятельная работа 70 час.

в том числе на подготовку к экзамену 36 час.

зачет не предусмотрен

экзамен 8 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 04.03.01 «Химия» утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 17 июля 2017 г. № 671

Рабочая программа обсуждена на заседании Департамента химии и материалов Институт наукоемких технологий и передовых материалов  
протокол № 2 от «21» октября 2021 г.

Директор Департамента химии и материалов Капустина А.А.

Составитель : д.х.н., доцент Васильева М.С.

Владивосток

2022

## Оборотная сторона титульного листа РПД

### **I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

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

Директор департамента \_\_\_\_\_ А.А. Капустина  
(подпись) (И.О. Фамилия)

### **II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

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

Директор департамента \_\_\_\_\_ А.А. Капустина  
(подпись) (И.О. Фамилия)

### **III. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

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

Директор департамента \_\_\_\_\_ А.А. Капустина  
(подпись) (И.О. Фамилия)

### **IV. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

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

Директор департамента \_\_\_\_\_ А.А. Капустина  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## I. Цели и задачи освоения дисциплины:

### Цель:

Подготовить студентов к химико-технологической деятельности на предприятиях химической промышленности.

### Задачи:

- формирование знаний об основных закономерностях химических процессов, протекающих в реакционных аппаратах, основных методах и приемах повышения эффективности их работы.
- 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.

Для успешного изучения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы предварительные компетенции, полученные в результате изучения дисциплин: неорганическая химия, органическая химия, физическая химия и химическая технология. Приобретенные в данной дисциплине компетенции реализуются в ходе производственной практики и выполнения НИР.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие профессиональные компетенции:

Тип задач	Код и наименование профессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
научно-исследовательский	<b>ПК-1</b> Способен выбирать и использовать технические средства и методы испытаний для решения исследовательских задач химической направленности, поставленных специалистом более высокой квалификации	ПК-1.1 Планирует отдельные стадии исследования при наличии общего плана НИР
		ПК-1.2 Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных этапов НИР
		ПК-1.3 Выбирает технические средства и методы исследований (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР
Технологический	<b>ПК-3</b> Способен выбирать технические средства и	ПК -3.1 Планирует отдельные виды работ по проведению испытаний с

Тип задач	Код и наименование профессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
	методы испытаний для решения технологических задач, участвовать в оптимизации существующих и разработке новых технологий	целью совершенствования существующих технологий
		ПК -3.2 Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач
		ПК -3.4 Разрабатывает предложения по совершенствованию технологии производства продукции
Технологический	<b>ПК-4</b> Способен осуществлять контроль качества сырья, компонентов и выпускаемой продукции химического назначения, проводить паспортизацию товарной продукции	ПК-4-1 Выполняет стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
ПК-1.1 Планирует отдельные стадии исследования при наличии общего плана НИР	<b>Знает</b> основы планирования стадий исследования химической направленности
	<b>Умеет</b> планировать отдельные стадии исследования химической направленности при наличии общего плана НИР
	<b>Владеет</b> навыками планирования отдельных стадий исследования химической направленности при наличии общего плана НИР
ПК-1.2 Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных этапов НИР	<b>Знает</b> источники информации, необходимые для подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности
	<b>Умеет</b> составлять элементы документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности
	<b>Владеет</b> навыками подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности
ПК-1.3 Выбирает технические средства и методы исследований (из набора имеющихся) для	<b>Знает</b> м источники информации и основные принципы выбора технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
решения поставленных задач НИР	поставленных задач НИР химической направленности
	<b>Умеет</b> выбирать технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности
	<b>Владеет</b> навыками выбора технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности.
ПК -3.1 Планирует отдельные виды работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий	<b>Знает</b> основы планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий
	<b>Умеет</b> применять на практике основы планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий
	<b>Владеет</b> навыками планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий.
ПК -3.2 Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач	<b>Знает</b> требования, необходимые для подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных химико-технологических задач
	<b>Умеет</b> составлять элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач
	<b>Владеет</b> о навыками подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных химико-технологических задач
ПК -3.4 Разрабатывает предложения по совершенствованию технологии производства продукции	Знает современные требования, предъявляемые технологиям производства продукции и способы их совершенствования
	Умеет разрабатывать предложения по совершенствованию технологии производства продукции
	Владеет навыками разработки предложений по совершенствованию технологии производства продукции.
ПК-4-1 Выполняет стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства	<b>Знает</b> стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства
	<b>Умеет</b> применять стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства;
	<b>Владеет</b> навыками выполнения стандартных операций на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства

## II. Трудоемкость дисциплины и видов учебных занятий по дисциплине

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачётные единицы 144 академических часа).

(1 зачетная единица соответствует 36 академическим часам)

Видами учебных занятий и работы обучающегося по дисциплине являются:

Обозначение	Виды учебных занятий и работы обучающегося
Лек	Лекции
Лаб	Лабораторные работы
СР	Самостоятельная работа обучающегося в период теоретического обучения
Контроль	Самостоятельная работа обучающегося и контактная работа обучающегося с преподавателем в период промежуточной аттестации

Структура дисциплины:

Форма обучения – очная.

№	Наименование раздела дисциплины	Семестр	Количество часов по видам учебных занятий и работы обучающегося						Формы промежуточной аттестации
			Лек	Лаб	Пр	ОК	СР	Контроль	
1	Раздел I. Химико-технологические процессы	8	4	4	-	-	4	9	УО-1; ПР-6; ПР-12
2	Раздел 2. Гетерогенные процессы	8	4	36	-		10	9	УО-1; ПР-6; ПР-12
3	Раздел 3. Гетерогенно-каталитические процессы	8	4	14	-		10	9	УО-1; ПР-6; ПР-12
4	Раздел 4. Химические реакторы	8	8	36	-		10	9	УО-1; ПР-6; ПР-12
	Итого:		20	90		-	34	36	

## III. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

**Лекционные занятия (36 час.)**

**Раздел 1. 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).

### **Раздел 2. Гетерогенные процессы (4 час.)**

#### **Тема 1. Общие сведения о гетерогенных процессах (2 час.)**

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

#### **Тема 2. Схема гетерогенного процесса (2 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 3. 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.

#### **Раздел 4. Химические реакторы (8 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 (1 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 (1 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.

#### **IV. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ** **Лабораторные работы (90 часов)**

**Лабораторная работа 1. Химическое равновесие в многокомпонентной смеси (10 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 (10 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 (8 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 (10 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 (10 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) (10 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 (10 час.)**

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

#### **Лабораторная работа 8. Реакторы в режимах идеального смешения и вытеснения (10 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).

Подготовка к лабораторным работам и их выполнение осуществляется студентами самостоятельно. Выполнение лабораторных работ является обязательным условием допуска к экзамену.

Подготовка к лабораторным работам и их выполнение осуществляется студентами самостоятельно.

#### **Самостоятельная работа**

Подготовка к расчетной работе.

1. Расчетная работа по теме «Стехиометрия. Материальный и тепловой баланс»
2. Расчетная работа по теме «Термодинамика в расчетах химических процессов».
3. Расчетная работа по теме «Кинетика в расчетах химических процессов».
4. Расчетная работа по теме «Гетерогенные процессы и гетерогенные реакторы».
5. Расчетная работа по теме «Пористое зерно катализатора».
6. Расчетная работа по теме «Внутридиффузионная область».

7. Расчетная работа по теме «Реакторы идеального смешения и вытеснения. Изотермический режим».
8. Расчетная работа по теме «Реакторы идеального смешения и вытеснения. Неизотермический режим».

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

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине включает в себя:

- план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;
- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

### **План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине**

<b>№ п/п</b>	<b>Дата/сроки выполнения</b>	<b>Вид самостоятельной работы</b>	<b>Примерные нормы времени на выполнение</b>	<b>Форма контроля</b>
1	В течение семестра	Подготовка к лабораторным занятиям, изучение литературы	6 часов	Работа на лабораторных занятиях (ПР-6)
2	1-3 неделя семестра	Подготовка к лабораторным занятиям, изучение литературы.	6 часа	УО-1 (собеседование/устный опрос)
3	4-6 неделя семестра	Подготовка к лабораторным занятиям, изучение литературы, подготовка к контрольной расчетной работе	6 часов	ПР-12 УО-1 (собеседование/устный опрос)
4	7-11 неделя семестра	Подготовка к лабораторным занятиям, подготовка к контрольной расчетной работе	6 часов	ПР-12 УО-1 (собеседование/устный опрос)
5		Подготовка к экзамену	36 часов	зачет
<b>Итого:</b>			<b>72 часа</b>	

## **Рекомендации по самостоятельной работе студентов**

*Планирование и организация времени, отведенного на выполнение заданий самостоятельной работы.*

Изучив график выполнения самостоятельных работ, следует правильно её организовать. Рекомендуется изучить структуру каждого задания, обратить внимание на график выполнения работ, отчетность по каждому заданию предоставляется в последнюю неделю согласно графику. Обратите внимание, что итоги самостоятельной работы влияют на окончательную оценку по итогам

освоения учебной дисциплины.

*Работа с литературой.*

При выполнении ряда заданий требуется работать с литературой. Рекомендуется использовать различные возможности работы с литературой: фонды научной библиотеки ДВФУ (<http://www.dvfu.ru/library/>) и других ведущих вузов страны, а также доступных для использования научно-библиотечных систем.

В процессе выполнения самостоятельной работы, в том числе при написании реферата рекомендуется работать со следующими видами изданий:

а) Научные издания, предназначенные для научной работы и содержащие теоретические, экспериментальные сведения об исследованиях. Они могут публиковаться в форме: монографий, научных статей в журналах или в научных сборниках;

б) Учебная литература подразделяется на:

- учебные издания (учебники, учебные пособия, тексты лекций), в которых содержится наиболее полное системное изложение дисциплины или какого-то ее раздела;

- справочники, словари и энциклопедии – издания, содержащие краткие сведения научного или прикладного характера, не предназначенные для сплошного чтения. Их цель – возможность быстрого получения самых общих представлений о предмете.

Существуют два метода работы над источниками:

– сплошное чтение обязательно при изучении учебника, глав монографии или статьи, то есть того, что имеет учебное значение. Как правило, здесь требуется повторное чтение, для того чтобы понять написанное. Старайтесь при сплошном чтении не пропускать комментарии, сноски, справочные материалы, так как они предназначены для пояснений и помощи. Анализируйте рисунки (карты, диаграммы, графики), старайтесь понять, какие тенденции и закономерности они отражают;

– метод выборочного чтения дополняет сплошное чтение; он применяется для поисков дополнительных, уточняющих необходимых сведений в словарях, энциклопедиях, иных справочных изданиях. Этот метод крайне важен для повторения изученного и его закрепления, особенно при подготовке к зачету.

Для того чтобы каждый метод принес наибольший эффект, необходимо фиксировать все важные моменты, связанные с интересующей Вас темой.

Тезисы – это основные положения научного труда, статьи или другого произведения, а возможно, и устного выступления; они несут в себе большой объем информации, нежели план. Простые тезисы лаконичны по форме; сложные – помимо главной авторской мысли содержат краткое ее обоснование и доказательства, придающие тезисам более весомый и убедительный характер. Тезисы прочитанного позволяют глубже раскрыть его содержание; обучаясь излагать суть прочитанного в тезисной форме, вы сумеете выделять из множества мыслей авторов самые главные и ценные и делать обобщения.

Конспект – это способ самостоятельно изложить содержание книги или статьи в логической последовательности. Конспектируя какой-либо источник, надо стремиться к тому, чтобы немногими словами сказать о многом. В тексте конспекта желательно поместить не только выводы или положения, но и их аргументированные доказательства (факты, цифры, цитаты).

Писать конспект можно и по мере изучения произведения, например, если прорабатывается монография или несколько журнальных статей.

Составляя тезисы или конспект, всегда делайте ссылки на страницы, с которых вы взяли конспектируемое положение или факт, – это поможет вам сократить время на поиск нужного места в книге, если возникает потребность глубже разобраться с излагаемым вопросом или что-то уточнить при написании письменных работ.

### **Методические рекомендации по выполнению заданий для самостоятельной работы и критерии оценки.**

Самостоятельная работа студентов включает в себя подготовку к лабораторным работам, описание проделанной экспериментальной работы с приведением расчетов, графиков, таблиц и выводов, подготовка к защите теории по работе, самоконтроль знаний по теме работы с помощью вопросов к каждой работе, подготовка к выполнению расчетных задач.

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

Оценка «Отлично»

- А) Задание выполнено полностью.
- Б) Отчет/ответ составлен грамотно.
- В) Ответы на вопросы полные и грамотные.
- Г) Материал понят, осознан и усвоен.

Оценка «Хорошо»

- А), Б) - те же , что и при оценке «Отлично».
- В) Неточности в ответах на вопросы, которые исправляются после уточняющих вопросов.
- Г) Материал понят, осознан и усвоен.

Оценка «Удовлетворительно»

- А), Б) - те же , что и при оценке «Отлично».
- В) Неточности в ответах на вопросы, которые не всегда исправляются после уточняющих вопросов.
- Г) Материал понят, осознан, но усвоен не достаточно полно.

Оценка «Неудовлетворительно»

- А) Программа не выполнена полностью.
- Б) Устный отчет и ответы на вопросы не полные и не грамотные.
- В) Материал не понят, не осознан и не усвоен.

## VI. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируем ые модули/ разделы / темы дисциплины	Код индикатора достижения компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства – наименование	
				текущий контроль	промежуточ ная аттестация

1	Раздел I. Химико-технологические процессы	ПК-3-2 Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач	<p><b>знает</b> требования, необходимые для подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных химико-технологических задач;</p> <p><b>умеет</b> составлять элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач;</p> <p><b>владеет</b> навыками подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных химико-технологических задач.</p>	УО-1 собеседование / устный опрос	вопросы к экзамену  1-27
		ПК-4-1 Выполняет стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства	<p>знает стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства;</p> <p>умеет применять стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства;</p> <p>владеет навыками выполнения стандартных операций на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства.</p>	УО-1 собеседование / устный опрос	
	Раздел 2. Гетерогенные процессы	ПК-3-1 Планирует отдельные виды работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий	<p><b>знает</b> основы планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий;</p> <p><b>умеет</b> применять на практике основы планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования</p>	УО-1 собеседование / устный опрос	вопросы к экзамену  31,32

			<p>существующих технологий;</p> <p><b>владеет</b> навыками планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий.</p>		
3	Раздел 3. Гетерогенно-каталитические процессы	ПК-3-4 Разрабатывает предложения по совершенствованию технологии производства продукции	<p><b>знает</b> современные требования, предъявляемые технологиям производства продукции и способы их совершенствования;</p> <p><b>умеет</b> разрабатывать предложения по совершенствованию технологии производства продукции;</p> <p><b>владеет</b> навыками разработки предложений по совершенствованию технологии производства продукции</p>	<p>УО-1 собеседование / устный опрос</p> <p>ПР-12 контрольно-расчетная работа</p> <p>ПР-6 лабораторная работа</p>	вопросы к экзамену 28-30
4	Раздел 4. Химические реакторы	ПК-1-1. Планирует отдельные стадии исследования при наличии общего плана НИР	<p><b>Знает</b> основы планирования стадий исследования химической направленности;</p> <p><b>умеет</b> планировать отдельные стадии исследования химической направленности при наличии общего плана НИР;</p> <p><b>владеет</b> навыками планирования отдельных стадий исследования химической направленности при наличии общего плана НИР.</p>	<p>УО-1 собеседование / устный опрос</p> <p>ПР-12 контрольно-расчетная работа</p> <p>ПР-6 лабораторная работа</p>	вопросы к экзамену 33-39
		ПК-1-2. Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных этапов НИР	<p><b>знает</b> источники информации, необходимые для подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности;</p> <p><b>умеет</b> составлять элементы документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности;</p> <p><b>владеет</b> навыками подготовки элементов документации, проектов планов и программ</p>	<p>УО-1 собеседование / устный опрос</p> <p>ПР-12 контрольно-расчетная работа</p> <p>ПР-6 лабораторная работа</p>	вопросы к экзамену 33-39



			отдельных этапов НИР химической направленности.		
		ПК-1-3 Выбирает технические средства и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР	<p><b>знает</b> источники информации и основные принципы выбора технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности;</p> <p><b>умеет</b> выбирать технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности;</p> <p><b>владеет</b> навыками выбора технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности.</p>	УО-1 собеседование / устный опрос	
		ПК-3-4 Разрабатывает предложения по совершенствованию технологии производства продукции	<p>знает современные требования, предъявляемые технологиям производства продукции и способы их совершенствования</p> <p>умеет разрабатывать предложения по совершенствованию технологии производства продукции;</p> <p>владеет навыками разработки предложений по совершенствованию технологии производства продукции.</p>	УО-1 собеседование / устный опрос	вопросы к экзамену 33-39
				ПР-12 контрольно- расчетная работа  ПР-6 лабораторная работа	
				ПР-12 контрольно- расчетная работа  ПР-6 лабораторная работа	

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также качественные критерии оценивания, которые описывают уровень сформированности компетенций, представлены в разделе VIII.

## VII. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

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 // Соровский 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=20184083>

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»

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

Платформа электронного обучения Blackboard ДВФУ.

[https://bb.dvfu.ru/webapps/blackboard/content/listContentEditable.jsp?content\\_id=159675\\_1&course\\_id=4959\\_1](https://bb.dvfu.ru/webapps/blackboard/content/listContentEditable.jsp?content_id=159675_1&course_id=4959_1)

### **Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

1. База данных Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
2. База данных Web of Science <http://apps.webofknowledge.com/>

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

**Планирование и организация времени, отведенного на изучение дисциплины.** Приступить к освоению дисциплины следует незамедлительно

в самом начале учебного семестра. Рекомендуется изучить структуру и основные положения Рабочей программы дисциплины. Обратит внимание, что кроме аудиторной работы (лекции, лабораторные занятия) планируется самостоятельная работа, итоги которой влияют на окончательную оценку по итогам освоения учебной дисциплины. Все задания (аудиторные и самостоятельные) необходимо выполнять и предоставлять на оценку в соответствии с графиком.

В процессе изучения материалов учебного курса предлагаются следующие формы работ: чтение лекций, лабораторные занятия, задания для самостоятельной работы.

*Лекционные занятия* ориентированы на освещение вводных тем в каждый раздел курса и призваны ориентировать студентов в предлагаемом материале, заложить научные и методологические основы для дальнейшей самостоятельной работы студентов.

*Лабораторные занятия* акцентированы на наиболее принципиальных и проблемных вопросах курса и призваны стимулировать выработку практических умений.

Особо значимой для профессиональной подготовки студентов является *самостоятельная работа* по курсу. В ходе этой работы студенты отбирают необходимый материал по изучаемому вопросу и анализируют его. Студентам необходимо ознакомиться с основными источниками, без которых невозможно полноценное понимание проблематики курса.

Освоение курса способствует развитию навыков обоснованных и самостоятельных оценок фактов и концепций. Поэтому во всех формах контроля знаний, особенно при сдаче зачета, внимание обращается на понимание проблематики курса, на умение практически применять знания и делать выводы.

**Работа с литературой.** Рекомендуется использовать различные возможности работы с литературой: фонды научной библиотеки ДВФУ и электронные библиотеки (<http://www.dvfu.ru/library/>), а также доступные для использования другие научно-библиотечные системы.

**Подготовка к экзамену.** К сдаче экзамена допускаются обучающиеся, выполнившие и сдавшие отчеты по всем заданиям (лабораторным, самостоятельным), предусмотренные учебной программой дисциплины, посетившие не менее 85% аудиторных занятий.

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

Перечень материально-технического и программного обеспечения дисциплины приведен в таблице.

### Материально-техническое и программное обеспечение дисциплины

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпус L, ауд. L 502. Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации	Помещение укомплектовано специализированной учебной мебелью (посадочных мест – 30)  Оборудование: ЖК-панель 47", Full HD, LG M4716 CCBA – 1 шт. Доска аудиторная.	Windows Edu Per Device 10 Education, O365 EDU A1, Microsoft 365 Apps for enterprise EDU
690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпус L, ауд. L 550. Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.	Оборудование: Моноблок Lenovo C360G-i34164G500UDK – 15 шт. Интегрированный сенсорный дисплей Polymedia FlipBox - 1 шт. Копир-принтер-цветной сканер в e-mail с 4 лотками Xerox WorkCentre 5330 (WC5330C – 1 шт.) Помещение укомплектовано специализированной учебной мебелью (посадочных мест – 30) и компьютерами)	Windows Edu Per Device 10 Education, O365 EDU A1, Microsoft 365 Apps for enterprise EDU

## Х. ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Для дисциплины «Химическая технология» используются следующие оценочные средства:

Устный опрос:

1. Собеседование (УО-1)

Письменные работы:

1. Лабораторная работа (ПР-6)

2. Контрольно-расчетная работа (ПР-12)

### Устный опрос

Устный опрос позволяет оценить знания и кругозор студента, умение логически построить ответ, владение монологической речью и иные коммуникативные навыки.

Обучающая функция состоит в выявлении деталей, которые по каким-то

причинам оказались недостаточно осмысленными в ходе учебных занятий и при подготовке к зачёту.

Собеседование (УО-1) – средство контроля, организованное как специальная беседа преподавателя с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.

### **Письменные работы**

Письменный ответ приучает к точности, лаконичности, связности изложения мысли. Письменная проверка используется во всех видах контроля и осуществляется как в аудиторной, так и во внеаудиторной работе.

Лабораторная работа (ПР-6) – средство для закрепления и практического освоения материала по определенному разделу.

Контрольно-расчетная работа (ПР-12) – средство проверки умений применять полученные знания по заранее определенной методике для решения задач или заданий по модулю или дисциплине.

## **Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

### **Оценочные средства для промежуточной аттестации**

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной. Форма отчётности по дисциплине – экзамен (8-й семестр).

### **Методические указания по сдаче экзамена**

Экзамен принимается ведущим преподавателем.

В исключительных случаях, по согласованию с заместителем директора Школы по учебной и воспитательной работе, заведующий кафедрой имеет право принять зачет в отсутствие ведущего преподавателя.

Форма проведения экзамена (устная, письменная и др.) утверждается на заседании кафедры по согласованию с руководителем в соответствии с рабочей программой дисциплины.

Присутствие на экзамене посторонних лиц (кроме лиц, осуществляющих проверку) без разрешения соответствующих лиц (ректора либо проректора по учебной и воспитательной работе, директора Школы, руководителя ОПОП или директора департамента), не допускается. Инвалиды

и лица с ограниченными возможностями здоровья, не имеющие возможности самостоятельного передвижения, допускаются зачет с сопровождающими.

При промежуточной аттестации обучающимся устанавливается оценка по пятибальной шкале.

Оценки выставляются в электронную ведомость и могут формироваться на основе рейтинга.

Студенты, пропустившие более 10% лабораторных работ и практических занятий без уважительной причины или не отработавшие пропуски занятий по уважительной причине к промежуточной и итоговой аттестации не допускаются.



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

---

**ИНСТИТУТ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
Химические реакторы  
**Направление подготовки 04.03.01 «Химия»**  
Химия и химическая инженерия (совместно с НЗМУ)  
Форма подготовки очная

**Владивосток**  
**2022**



№ п/п	Контролируемые модули/разделы / темы дисциплины	Код индикатора достижения компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства – наименование	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Раздел I. Химико-технологические процессы	ПК-3-2 Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач	<p><b>знает</b> требования, необходимые для подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных химико-технологических задач;</p> <p><b>умеет</b> составлять элементы документации, проекты планов и программ отдельных химико-технологических задач;</p> <p><b>владеет</b> навыками подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных химико-технологических задач.</p>	УО-1 собеседование / устный опрос  ПР-12 контрольно-расчетная работа  ПР-6 лабораторная работа	вопросы к экзамену  1-27
	Раздел 2. Гетерогенные процессы	ПК-3-1 Планирует отдельные виды работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий	<p><b>знает</b> основы планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий;</p> <p><b>умеет</b> применять на практике основы планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий;</p> <p><b>владеет</b> навыками планирования отдельных видов работ по проведению испытаний с целью совершенствования существующих технологий.</p>	УО-1 собеседование / устный опрос  ПР-12 контрольно-расчетная работа  ПР-6 лабораторная работа	вопросы к экзамену 31,32
		ПК -4.1 Выполняет стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства	<p><b>знает</b> стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства;</p> <p><b>умеет</b> применять стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной</p>	ПР-6 лабораторная работа	вопросы к экзамену 31,32

			<p>продукции химического производства;</p> <p><b>владеет</b> навыками выполнения стандартных операций на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства.</p>		
	Раздел 3. Гетерогенно-каталитические процессы	ПК-3-4 Разрабатывает предложения по совершенствованию технологии производства продукции	<p><b>знает</b> современные требования, предъявляемые технологиям производства продукции и способы их совершенствования;</p> <p><b>умеет</b> разрабатывать предложения по совершенствованию технологии производства продукции;</p> <p><b>владеет</b> навыками разработки предложений по совершенствованию технологии производства продукции</p>	<p>УО-1 собеседование / устный опрос</p> <p>ПР-12 контрольно-расчетная работа</p> <p>ПР-6 лабораторная работа</p>	вопросы к экзамену 28-30
2	Раздел 4. Химические реакторы	ПК-1-1. Планирует отдельные стадии исследования при наличии общего плана НИР	<p><b>Знает</b> основы планирования стадий исследования химической направленности;</p> <p><b>умеет</b> планировать отдельные стадии исследования химической направленности при наличии общего плана НИР;</p> <p><b>владеет</b> навыками планирования отдельных стадий исследования химической направленности при наличии общего плана НИР.</p>	<p>УО-1 собеседование / устный опрос</p> <p>ПР-12 контрольно-расчетная работа</p> <p>ПР-6 лабораторная работа</p>	вопросы к экзамену 33-39
3.		ПК-1-2. Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных этапов НИР	<p><b>знает</b> источники информации, необходимые для подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности;</p> <p><b>умеет</b> составлять элементы документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической</p>	<p>УО-1 собеседование / устный опрос</p> <p>ПР-12 контрольно-расчетная работа</p> <p>ПР-6 лабораторная работа</p>	вопросы к экзамену 33-39

			направленности; <b>владеет</b> навыками подготовки элементов документации, проектов планов и программ отдельных этапов НИР химической направленности.	
		ПК-1-3 Выбирает технические средства и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР	<b>знает</b> источники информации и основные принципы выбора технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности;  <b>умеет</b> выбирать технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности;  <b>владеет</b> навыками выбора технических средств и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР химической направленности.	УО-1 собеседование / устный опрос  ПР-12 контрольно- расчетная работа  ПР-6 лабораторная работа

### I. Промежуточная аттестация по дисциплине «Химические реакторы»

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Химические реакторы» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной. Оценка по дисциплине выставляется по результатам рейтинга и отражена в шкале оценки результатов обучения.

Для студентов, по уважительной причине не сдавшим коллоквиумы, возможна сдача экзамена комиссии. Выполнение лабораторных работ является обязательным.

#### 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 единичный 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  
 $aA + bB \rightarrow rR + sS$ ,  
если известно, что для проведения реакции взято  $nA,0$  моль реагента А и  $nB,0$  моль реагента В.
5. В химической реакции участвуют два реагента А и В, причем на каждый моль реагента А

- взято по 2 моль реагента В. В каком случае будет справедливо утверждение, что степень превращения  $x_A$  реагента А больше степени превращения  $x_B$  реагента В?
- В чем различия между действительной и равновесной степенями превращения реагента?
  - С какой целью при проведении химических процессов в промышленных условиях один из реагентов часто берут в избытке по отношению к стехиометрии реакции? Каковы пути использования реагента, взятого в избытке и не вступившего в реакцию?
  - Выведите уравнение связи между выходом продукта и степенью превращения одного из реагентов для обратимой химической реакции, не сопровождающейся побочными взаимодействиями.
  - В чем различие между полной (интегральной) и мгновенной (дифференциальной) селективностями?
  - Что называется производительностью, мощностью, интенсивностью?
  - Как связаны между собой:
    - производительность и степень превращения реагента;
    - производительность и выход целевого продукта?
  - Сформулируйте основной круг задач, решаемых в химической технологии при выборе технологического режима на основании законов химической термодинамики.
  - Как определить направленность химической реакции? Как, сравнивая значения энергии Гиббса  $\Delta G$  для различных реакций, определить, какая из них является спонтанной (самопроизвольной)?
  - Что характеризует химическое равновесие?
  - Сформулируйте принцип Ле Шателье. Как он помогает предсказать влияние изменения температуры и давления на состояние равновесия химической реакции?
  - Используя принцип Ле Шателье, проанализируйте для приведенных реакций все возможные способы смещения равновесия вправо:
 

$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$	$\Delta H < 0;$
$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$	$\Delta H > 0;$
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	$\Delta H < 0;$
$2C_2H_5OH \rightleftharpoons C_4H_6 + 2H_2O + H_2$	$\Delta H > 0.$
  - Почему можно исключить из выражения для константы равновесия концентрации компонентов, являющихся чистыми твердыми веществами или жидкостями?
  - Чем различаются определения скорости гомогенной и гетерогенной химических реакций?
  - Как взаимосвязаны между собой реальные скорости образования или расходования отдельных участников реакции  $aA + bB \rightleftharpoons rR + sS$ ?
  - В чем заключается различие между микрокинетикой и макрокинетикой?
  - Что такое частный порядок реакции по компоненту J? Как взаимосвязаны частные порядки по разным компонентам и общий порядок реакции?
  - Какие реакции называют простыми, формально простыми, сложными?
  - Как составляют кинетические уравнения простых реакций?
  - Как составляют кинетические уравнения сложных реакций:
    - с известным механизмом реакции;
    - с неизвестным механизмом реакции?
  - От каких микрокинетических факторов зависит скорость химической реакции?
  - В гомогенной химической реакции участвуют два реагента А и В. Реакция имеет первый порядок по реагенту А и второй порядок по реагенту В. Увеличение концентрации какого реагента даст больший эффект увеличения скорости реакции?
  - Запишите уравнение Аррениуса в дифференциальной, интегральной и логарифмической формах. В чем суть уравнения Аррениуса?
  - 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 выставления оценки студенту на экзамене

К экзамену допускаются обучающиеся, выполнившие программу обучения по дисциплине, прошедшие все этапы текущей аттестации.

Оценка	Требования к сформированным компетенциям
«отлично»	Студент показал развернутый ответ, представляющий собой связное, логическое, последовательное раскрытие поставленного вопроса, широкое знание литературы. Студент обнаружил понимание материала, обоснованность суждений, способность применить полученные знания на практике. Допускаются некоторые неточности в ответе, которые студент исправляет самостоятельно.
«хорошо»	Аналогично отметке "Отлично". Допущены 2-3 несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя, наблюдалась "шероховатость" в изложении материала.
«удовлетворительно»	Учебный материал, в основном, изложен полно, но при этом допущены 1-2 существенные ошибки (например, неумение применять законы и теории к объяснению новых фактов).

	Ответ неполный, хотя и соответствует требуемой глубине, построен несвязно.
<b>«неудовлетворительно»</b>	Студент обнаруживает незнание большей части проблем, связанных с изучением вопроса, допускает ошибки в ответе, искажает смысл текста, беспорядочно и неуверенно излагает материал. Данная оценка характеризует недостатки в подготовке студента, которые являются серьезным препятствием к успешной профессиональной и научной деятельности.

**Шкала оценки уровня достижения результатов обучения для текущей и промежуточной аттестации по дисциплине**

**«Химические реакторы»**

Баллы (рейтинговая оценка) / оценка	Уровни достижения результатов обучения		Требования к сформированным компетенциям
	Текущая и промежуточная аттестация	Промежуточная аттестация	
100-86	Повышенный	«отлично»	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез химико-технологической информации, применять системный подход для решения поставленных научно-исследовательских задач. Способен самостоятельно организовывать и осуществлять химико-технологическую деятельность. Владеет навыками использования научно и технологически обоснованного содержания, форм, методов и приемов организации работы при осуществлении научно-исследовательской и химико-технологической деятельности.
85-76	Базовый	«хорошо»	В большинстве случаев способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез химико-технологической информации, применять системный подход для решения поставленных научно-исследовательских задач. Способен организовывать и осуществлять химико-технологическую деятельность. Допускает единичные серьезные ошибки в решении методических проблем, испытывает сложности

			в редко встречающихся или сложных случаях решения методических проблем, не знает типичных ошибок и возможных сложностей при решении той или иной методической проблемы.
75-61	Пороговый	«удовлетворительно»	Допускает ошибки в определении достоверности источников химико-технологической информации, способен правильно решать только типичные, наиболее часто встречающиеся методические проблемы в при решении определенных химико-технологических задач. (Не способен выбирать рациональный метод решения проблемы (задачи)).
60-0	Уровень не достигнут	«неудовлетворительно»	Не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет задания или не выполняет их вообще.

### Оценочные средства для текущей аттестации

Текущая аттестация студентов по дисциплине проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Химические реакторы проводится в форме контрольных мероприятий (выполнения лабораторных работ, выполнения контрольных и самостоятельных расчетно-графических работ,) по оцениванию фактических результатов обучения студентов и осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);

- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;

- результаты самостоятельной работы.

По каждому объекту дается характеристика процедур оценивания в привязке к используемым оценочным средствам.

## Вопросы для собеседования / устного опроса

### I. Устный опрос

1. **Собеседование** (УО-1) (Средство контроля, организованное как специальная беседа преподавателя с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по теме лабораторной работы.)

### Критерии оценивания

Оценка	Требования
«зачтено»	Студент показал развернутый ответ на вопрос, знание литературы, обнаружил понимание материала, обоснованность суждений, неточности в ответе исправляет самостоятельно.
«не зачтено»	Студент обнаруживает незнание вопроса, неуверенно излагает ответ.

## Тематика контрольно-расчетных работ

### II. Письменные работы

1. Тест (ПР-1) (Система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося. Проводятся по разделам: «Основные процессы химической технологии» и «Аппараты для химических процессов») - Фонд тестовых заданий (задания с открытым ответом).

### Оценочные средства

#### Задания для самостоятельных расчетно-графических работ

#### № 1. «Стехиометрия. Материальный и тепловой баланс»

В 1
1. В реакторе идеального смешения проходят реакции:
$A + B \rightarrow R$
$A + A \rightarrow S$
$2S + B \rightarrow T + 2D$
$R + A \rightarrow T$
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.

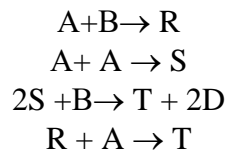


2. Составить материальный баланс процесса газификации 1 т кокса, идущей по реакциям:  
 $C + H_2O = CO + H_2 - 131 \text{ кДж};$   
 $CO + H_2O = CO + H_2 + 42 \text{ кДж}.$

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:



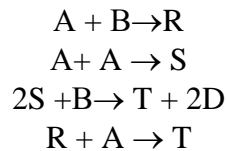
Определить производительность реактора по вещества R и S при следующих условиях:  $C_{A0}=2,0$  кмоль/моль,  $C_{B0}=1,7$  кмоль/моль; текущие концентрации веществ  $C_A=0,1$  кмоль/моль,  $C_B=0,5$  кмоль/моль,  $C_T=0,15$  кмоль/моль,  $C_D=0,05$  кмоль/моль, скорость подачи  $V_0 = 10^{-2} \text{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

2. Составить материальный баланс и рассчитать выход  $SO_2$  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. Реакция обжига:  $2ZnS + 3O_2 = 2ZnO + 2SO_2$ .

В огарке содержится 0,5 % массовых долей серы.

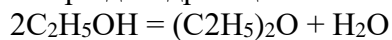
#### В 4

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.

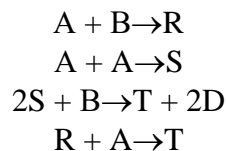
2. При дегидратации этилового спирта



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 м<sup>3</sup> сернистого газа, состоящего из 10 % объемных долей SO<sub>2</sub> в воздухе. Степень превращения SO<sub>2</sub> равна 90 %. Каким будет при этом состав смеси на выходе из реактора (в объемных долях, %)? Реакция: SO<sub>2</sub> + 0.5O<sub>2</sub> = SO<sub>3</sub> + 92000 Дж.  
Составить материальный баланс реактора окисления SO<sub>2</sub> в SO<sub>3</sub> при переработке 10 000 м<sup>3</sup>/ч сернистого газа, содержащего 10 % объемных долей SO<sub>2</sub> в воздухе.

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

### В1

1. Вывести уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента А по известной величине K<sub>c</sub> для реакции 2A ⇌ 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 SO<sub>2</sub> составляет 10% объемных долей.

### В2

1. Вывести уравнение для расчета равновесной степени превращения реагента А в газофазной реакции по известным значениям константы равновесия K<sub>p</sub> и давления P в системе для реакции A + B ⇌ 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<sub>p</sub> и давления P в системе.  
2. Обратимая реакция A + B ⇌ 2R протекает при температуре 298 К и характеризуется тепловым эффектом ΔH<sub>298</sub><sup>0</sup> = - 30 000 кДж/кмоль и изменением удельной энтропии ΔS<sub>298</sub><sup>0</sup> = -80 кДж/(кмоль·К). Определить, во сколько раз изменится равновесная степень превращения реагентов, если соотношение начальных концентраций реагентов C<sub>A0</sub>:C<sub>B0</sub> изменится от 0,5 до 0,25.

### В5

1. Вычислите величины K<sub>c</sub>, K<sub>N</sub>, K<sub>n</sub> для равновесной реакции  

$$C_6H_5 - C_2H_5 \rightleftharpoons C_6H_5 - CH = CH_2 + H_2,$$
если при температуре 580 °С найдена K<sub>p</sub> = 0,20, общее давление p = 0,005 МПа.  
2. Найдите константу равновесия при температурах 500 и 2000 К для реакции H<sub>2</sub>O + CO ⇌ H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>, если ΔG<sub>500</sub><sup>0</sup> = 20,2 кДж/моль и ΔG<sub>2000</sub><sup>0</sup> = 25,3 кДж/моль.

## № 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:  

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1)$$

$$CH_3COOH \rightarrow CH_2CO + H_2O \quad (2)$$
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  $C_{Rmax}$ , если: 1)  $k_1 \gg k_2$ ; 2)  $k_1 = k_2$ ; 3)  $k_1 \ll k_2$ .
2. Две параллельные реакции  
 $a_1A + b_1B = rR + sS$  (целевая реакция)  
 $a_2A + b_2B = yY + zZ$  (побочная реакция) характеризуются кинетическими уравнениями  
 $W_{цел} = k_1 C_A^{0,8} C_B^{1,54}$   
 $W_{поб} = k_1 C_A^{1,5} C_B^{0,5}$   
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 °С за время 1140 с степень превращения вещества А  $x_A = 0,79$ , при 40 °С 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:  
 $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$  (1)  
 $CH_3COOH \rightarrow CH_2CO + H_2O$  (2)  
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.

#### № 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  $A_T + B_T \rightarrow R_T + S_{TB}$  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.

### **№ 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 см<sup>2</sup>/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 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 0,14.

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 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 0,27. Определить, как изменится наблюдаемая скорость процесса и степень использования внутренней поверхности катализатора, если взять катализатор с толщиной 0,5 мм.

### № 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 незаполненного 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	$D_{12}, \text{см}^2/\text{с}$	№ п/п	Смесь газов	Т.К	$D_{12}, \text{см}^2/\text{с}$
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 дегидрирование 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.  $\Delta H = +220 \text{ кДж/моль}$ . 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 алюмоплатинового 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.

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

<b>В 1</b>
<p>1. Жидкофазная обратимая реакция <math>2A \leftrightarrow R</math>; проводится в РИС-н объемом <math>2,6 \text{ м}^3</math>. 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 <math>0,6 \text{ моль/л}</math>. 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 <math>1,8 \text{ м}</math> и диаметром <math>2,54 \text{ см}</math>. Реакцию изучали при температуре <math>350 \text{ }^\circ\text{C}</math> под давлением <math>4,9 \cdot 10^5 \text{ Па}</math>. 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 <math>350 \text{ }^\circ\text{C}</math> и давлении <math>2,45 \cdot 10^6 \text{ Па}</math>. Мощность промышленной установки по газу составляет <math>2,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}</math>. Исходная газовая смесь содержит <math>50\%</math> вещества A и <math>50\%</math> инерта. Требуемая степень превращения <math>0,8</math>. Определить, какое количество труб указанного размера должен иметь промышленный реактор.</p>
<b>В 2</b>
<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 <math>0,85 \text{ моль/л}</math>, степень превращения вещества A – <math>0,9</math>. Определить, какое количество вещества A можно переработать в РИС-н объемом <math>2 \text{ м}^3</math> и в РИВ объемом <math>0,6 \text{ м}^3</math>.</p> <p>2. Газофазный процесс, описываемый простой необратимой реакцией <math>2A \rightarrow 3R + S</math> первого порядка, проводится при температуре <math>457^\circ\text{C}</math> и давлении <math>9,81 \cdot 10^5 \text{ Па}</math>. Константа скорости равна <math>1,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}</math>, скорость подачи исходного реагента – <math>2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль/с}</math>, требуемая степень превращения <math>0,9</math>. Определить объем реактора идеального вытеснения для проведения данного процесса.</p>
<b>В 3</b>
<p>1. Жидкофазная обратимая реакция второго порядка <math>A + B = R + S</math> проводится в реакторе идеального смешения объемом <math>40 \text{ л}</math>. Константа скорости прямой реакции <math>k_1 = 1,8 \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{мин})</math>, обратной – <math>k_2 = 0,8 \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{мин})</math>. Вещества A и B подаются раздельно в стехиометрическом соотношении. Концентрации веществ в индивидуальных потоках равны <math>0,5 \text{ моль/л}</math>. Определить, какое количество веществ A и B перерабатывается за <math>1 \text{ ч}</math>, если степень превращения вещества A составляет <math>0,85</math> от равновесной.</p> <p>2. Жидкофазный процесс описывается реакцией</p> <div style="text-align: center;"><pre>graph LR; A -- k1 --&gt; R; A -- k2 --&gt; S;</pre></div> <p>Константы скоростей реакций <math>k_1 = 3,8 \text{ мин}^{-1}</math>; <math>k_2 = 1,5 \text{ мин}^{-1}</math>. Исходная концентрация вещества A равна <math>1,4 \text{ моль/л}</math>. Требуемая степень <math>x_A = 0,9</math>. Определить, какое количество вещества A можно переработать в РИС-н объемом <math>0,6 \text{ м}^3</math> и в РИВ объемом <math>0,2 \text{ м}^3</math>. Рассчитать селективность и производительность по целевому продукту R.</p>
<b>В 4</b>
<p>1. В жидкофазном процессе протекает реакция второго порядка <math>2A \rightarrow R</math> с константой скорости реакции равной <math>2,3 \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{мин})</math>. Объемный расход смеси с концентрацией исходного реагента <math>C_{A0} = 0,5 \text{ кмоль/м}^3</math> равен <math>3,6 \text{ м}^3/\text{ч}</math>. Определить производительность</p>

РИС-н объемом  $0,4 \text{ м}^3$  по продукту R. Рассчитать объем РИВ для полученной производительности.

2. Определить объем реактора идеального вытеснения для проведения процесса разложения фосфина. Реакция  $2\text{PH}_3 = 2\text{P}(\text{г}) + 3\text{H}_2$  протекает по первому порядку. Процесс проводится под давлением  $4,51 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и при температуре  $377 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расход фосфина составляет  $5,03 \cdot 10^{-4} \text{ кмоль/с}$ . Константа скорости реакции равна  $2,78 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Газовая постоянная  $R = 0,804 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 / (\text{кмоль} \cdot \text{град})$ . Требуемая степень превращения фосфина равна 0,8.

### № 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  $160 \text{ кДж/кмоль}$ . Раствор вещества A с концентрацией 0,2 молярной доли подается в реактор с температурой  $52 \text{ }^\circ\text{C}$ . В результате адиабатического разогрева при достижении степени превращения  $x_A = 0,93$  температура повышается на  $43 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить среднюю теплоемкость реакционного раствора.

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,  $\text{с}^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $r_{sp} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/град}$  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 град, а между вторым и третьим на 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной смеси к охлаждающей воде равен  $11000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ . 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 2

1. В реакторе идеального смешения непрерывного действия проводится экзотермическая реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  с тепловым эффектом равным  $190 \text{ кДж/кмоль}$ . Расход реагента A с температурой  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $0,2 \text{ кмоль/с}$ , теплоемкость реакционной смеси –  $16,7 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$ , температура реакционной смеси на выходе из реактора –  $49 \text{ }^\circ\text{C}$ , степень превращения по веществу A – 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  $368 \text{ К}$ . Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ . Константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $r_{sp} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/град}$  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 град,

а между вторым и третьим па 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной 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.

### В 3

1. Необратимая экзотермическая реакция  $A \rightarrow R + Q_p$  с константой скорости,  $\text{с}^{-1}$ , 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  $6,5 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{кмоль A}$ , концентрация исходного реагента –  $0,5 \text{ кмоль}/\text{м}^3$ . Теплоемкость реакционной смеси равна  $2400 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , а плотность –  $850 \text{ кг}/\text{м}^3$  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  $1,67 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$ . Константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho_{\text{ср}} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{град}$  остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества A в потоке равна  $1 \text{ кмоль}/\text{м}^3$ , молярная масса вещества A –  $100 \text{ кг}/\text{кмоль}$ , производительность каскада по продукту R –  $0,375 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль}/\text{с}$ , 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 град, а между вторым и третьим па 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной 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.

### В 4

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

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	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  $368 \text{ К}$ . Тепловой эффект реакции равен  $1,67 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$ . Константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $\rho_{\text{ср}} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{град}$  остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества A в потоке равна  $1 \text{ кмоль}/\text{м}^3$ , молярная масса вещества A –  $100 \text{ кг}/\text{кмоль}$ , производительность каскада по продукту R –  $0,375 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль}/\text{с}$ , 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 град, а между вторым и третьим на 5 град. Коэффициент теплопередачи во втором и третьем реакторе от реакционной смеси к охлаждающей воде равен  $11000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . 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 5

1. В проточном реакторе идеального смешения объемом  $2 \text{ м}^3$  проводится необратимая экзотермическая реакция с константой скорости,  $\text{с}^{-1}$ , описываемой уравнением  $k = 10^{12} \exp[-90000/(RT)]$ . Теплоемкость реакционной смеси равна  $20790 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  и не зависит от температуры и степени превращения. Плотность реакционной смеси остается постоянной и равной  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Исходный реагент с концентрацией  $6 \text{ кмоль}/\text{м}^3$  подается в реактор со скоростью  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Тепловой эффект реакции равен  $96600 \text{ Дж}/\text{моль}$ . 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  $1,67 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$ . Константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ , описывается уравнением  $k = 4 \cdot 10^6 \exp(-7900/T)$ . Произведение  $r_{sp} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{град}$  остается постоянным и не зависит от степени превращения и температуры. Исходная концентрация вещества А в потоке равна  $1 \text{ кмоль}/\text{м}^3$ , молярная масса вещества А –  $100 \text{ кг}/\text{кмоль}$ , производительность каскада по продукту R –  $0,375 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль}/\text{с}$ , 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  $11000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . 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.

Требования к представлению и оцениванию результатов:

Контрольная работа оценивается по 5-ти балльной шкале. Весовой коэффициент составляет 10% в общем балле рейтинга.

#### Отметка "Отлично"

1. В решении и объяснении нет ошибок.
2. Ход решения рациональный.
3. Если необходимо, решение произведено несколькими способами.
4. Допущены ошибки по невнимательности (оговорки, описки).

#### Отметка "Хорошо"

1. Существенных ошибок нет.
2. Допущены 1-2 несущественные ошибки или неполное объяснение, или использование 1 способа при заданных нескольких.

#### Отметка "Удовлетворительно"

1. Допущено не более одной существенной ошибки, записи неполны, неточности.

2. Решение выполнено с ошибками в математических расчетах.

Отметка "Неудовлетворительно"

1. Решение осуществлено только с помощью учителя.

2. Допущены существенные ошибки.

3. Решение и объяснение построены не верно.

### ***1. Выполнение лабораторных работ***

Лабораторная работа 1.	Химическое равновесие многокомпонентной смеси	в 10 час.
Лабораторная работа 2	Гетерогенные процессы и реакторы для гетерогенных процессов	10 час.
Лабораторная работа 3.	Параметры переноса в зернистом слое	8 час.
Лабораторная работа 4.	Пористое зерно катализатора	10 час.
Лабораторная работа 5.	Теоретические критерии	10 час
Лабораторная работа 6.	Окисление диоксида серы (процессы и реакторы)	10 час.
Лабораторная работа 7.	Трубчатые реакторы для гетерогенно-каталитических процессов	(10 час.
Лабораторная работа 8.	Реакторы в режимах идеального смешения и вытеснения	10 час.

### **Требования к представлению и оцениванию материалов (результатов):**

Перечислить

Выполнение лабораторных работ оценивается по 5-ти балльной шкале. Весовой коэффициент составляет 10% в общем балле рейтинга.