

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
«Институт катализа им. Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук»
(ИК СО РАН, Институт катализа СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ
Директор, академик РАН
В.И. Бухтияров



« 10 » апреля 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Б1.ОД.4 Процессы и аппараты химических технологий

Научная специальность: 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

Направленность: Процессы и аппараты химических технологий

Новосибирск, 2022 год

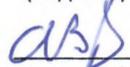
Программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20.08.2021 № 951 и локальными нормативными актами ИК СО РАН.

Составители рабочей программы:

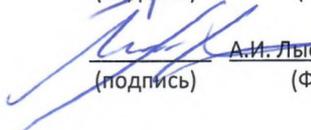
Старший научный сотрудник, к.т.н.
(должность, ученое звание, ученая степень)


(подпись) Н.В. Верниковская
(Ф.И.О.)

Ведущий научный сотрудник, д.т.н.
(должность, ученое звание, ученая степень)


(подпись) А.Н. Загоруйко
(Ф.И.О.)

Научный сотрудник, к.х.н.
(должность, ученое звание, ученая степень)


(подпись) А.И. Лысиков
(Ф.И.О.)

Рабочая программа утверждена на заседании Ученого совета ИК СО РАН
«15» апреля 2022 г., протокол № 6

Ученый секретарь,
к.х.н.


(подпись) М.О. Казаков
(Ф.И.О.)

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора по научной работе,
д.х.н.


(подпись) О.Н. Мартьянов
(Ф.И.О.)

1. Цели освоения дисциплины

Цель изучения дисциплины «Процессы и аппараты химических технологий» – формирование у аспирантов углубленных профессиональных знаний в области процессов и аппаратов химических технологий и готовности к самостоятельной научно-исследовательской деятельности. Задачей изучения данной дисциплины является систематизация знаний базовых разделов химической термодинамики, катализа, тепло- и массопереноса, теории химических реакторов, необходимых для решения задач в профессиональной сфере.

2. Место дисциплины в структуре программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий, направленность Процессы и аппараты химических технологий.

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)» образовательного компонента программы аспирантуры. Преподается в шестом семестре на третьем курсе.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности
Применять фундаментальные знания в области физической адсорбции для решения научных и практических задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратов на основе адсорбционных процессов
Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области приготовления катализаторов, адсорбентов и носителей для решения задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать:

- основные понятия химической кинетики, теоретические основы кинетики простых и сложных реакций, включая реакции с участием ферментов и катализаторов;
- основные понятия и теории химической термодинамики, катализа, теории химических реакторов;

Уметь:

- использовать фундаментальные знания в области физической адсорбции и приготовления катализаторов, носителей и адсорбентов для решения задач в профессиональной сфере;

Владеть навыками:

- расчета равновесного состава химической реакции;
- определения скорости простых и сложных реакций, включая каталитические реакции, для решения задач в профессиональной сфере.

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы/108 часов

	Объем часов / зачетных единиц
Всего	108/3
Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)	18
в том числе:	
лекции	-
практические занятия (семинары)	18
лабораторные занятия	

	Объём часов / зачетных единиц
Самостоятельная работа аспиранта (всего)	86
Контроль: кандидатский экзамен	4

5. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекц.	Практ. зан.	Лаб. зан.	СРА	Контроль	Всего
1	Равновесная химическая термодинамика		4		2		6
2	Формальная кинетика простых реакций		2		2		4
3	Формальная кинетика сложных реакций		2		2		4
4	Метод квазистационарных концентраций		2		2		4
5	Квазиравновесное приближение		2		2		4
6	Кинетика химических реакций в открытых системах		2		2		4
7	Кинетика гетерогенных каталитических реакций		2		2		4
8	Адсорбция, приготовление катализаторов и адсорбентов		2		2		4
9	Подготовка к кандидатскому экзамену				70		70
10	Кандидатский экзамен					4	4
	Итого			18	86	4	108

6. Содержание дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
Практические занятия		
1	Равновесная химическая термодинамика	Первое начало термодинамики, термохимия. Энтропия. Второе и третье начала термодинамики. Термодинамические потенциалы. Химический потенциал. Химическое равновесие в идеальных газах. Химическое равновесие в неидеальных системах.
2	Формальная кинетика простых реакций	Основные понятия и определения химической кинетики. Простые реакции. Запись кинетических уравнений. Определение порядка реакции. Нахождение энергии активации и эффективной константы скорости.
3	Формальная кинетика сложных реакций	Сложные реакции. Обратимые реакции. Принцип детального равновесия. Интегрирование кинетических уравнений обратимых реакций. Последовательные реакции. Параллельные реакции. Получение кинетических кривых для мономолекулярных и бимолекулярных параллельных реакций. Смешанные реакции. Методы интегрирования кинетических уравнений.
4	Метод квазистационарных концентраций	Метод квазистационарных концентраций. Критерии применимости.
5	Квазиравновесное приближение	Метод квазиравновесных концентраций. Критерий применимости.
6	Кинетика химических реакций в открытых	Реакции при постоянном давлении. Использование химической переменной на примере газовой реакции. Реакции в открытых

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
	системах	системах. Реактор идеального смешения. Реактор идеального вытеснения.
7	Кинетика гетерогенных каталитических реакций	Гетерогенный катализ. Механизмы Или-Ридила и Лэнгмюра-Хиншельвуда.
8	Адсорбция, приготовление катализаторов и адсорбентов	Адсорбционные равновесия. Основные взаимосвязи между параметрами пористой структуры адсорбентов. Формирование текстуры пористых материалов. Формирование нанесённых катализаторов и адсорбентов.

7. Самостоятельная работа аспирантов

Цель самостоятельной работы – закрепление, углубление и приобретение навыков применения теоретических знаний в практической работе, умения целенаправленно творчески работать с учебной, научной специальной литературой.

В самостоятельную работу аспирантов включается также подготовка к письменной контрольной работе – первому этапу кандидатского экзамена, систематизация теоретического материала по вопросам устного этапа кандидатского экзамена.

7.1 Вопросы для подготовки к устному этапу экзамена

Системный анализ процессов химической технологии

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

Типовые модели структуры потоков в аппаратах непрерывного действия

Модель идеального смешения. Вывод дифференциального уравнения модели. Условия реализуемости принятых допущений в приложении к аппаратам химической технологии. Модель идеального вытеснения. Вывод дифференциального уравнения модели. Сравнительная оценка идеальных моделей. Диффузионная модель. Последовательное и параллельное включение ячеек идеального смешения и вытеснения.

Химическая термодинамика

Система. Состояние системы. Уравнения состояния. Энергия. Работа. Теплота. Нулевой и первый законы термодинамики. Основные законы термохимии. О равновесных и обратимых процессах. Второй и третий законы термодинамики. Переменные состояния. Экстенсивные и интенсивные свойства. Характеристические уравнения состояния. Закрытые системы. Открытые системы, химический потенциал. Определение. Парциальные мольные величины. Реальные системы. Фугитивность, активность. Уравнения состояния. Гомогенные и гетерогенные системы. Фаза. Химическое равновесие. Закон действующих масс. Условия химического равновесия. Математическая модель химического равновесия. Константа химического равновесия, различные формы ее выражения и связь между ними. Основы расчета равновесного состава многокомпонентной реагирующей смеси без использования детерминированных химических реакций. Балансовые ограничения. Расчет равновесного состава с использованием детерминированных химических реакций. Балансовые ограничения. Зависимость равновесного состава от температуры и давления. Изотермическое и адиабатическое равновесие.

Термодинамика фазовых равновесий. Идеальные и реальные системы. Законы Генри, Рауля, области их применимости. Молярная свободная энергия Гиббса и фугитивность чистого компонента. Современные уравнения состояния реальных газов и жидкостей. Химический потенциал чистого компонента и компонентов смеси. Расчет термодинамических свойств многокомпонентной смеси (энтальпии, теплоемкости, энтропии) с использованием современных уравнений состояния. Фазовые диаграммы многокомпонентной смеси на плоскости P-T и на плоскости P-V. Характерные граничные линии (бинодаль, спинодаль), их физический смысл и практическое значение. Характерные особые точки (критическая точка).

Тепловые процессы

Основные понятия и определения. Температура. Теплообмен. Теплопроводность. Конвективный перенос тепла. Тепловой поток. Уравнение Фурье. Коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи. Свободная конвекция. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Критерии подобия процессов конвективного теплообмена. Теплоотдача в дисперсных системах с твердой фазой. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния веществ (кипение и испарение, конденсация).

Теплообменные аппараты. Назначение и классификация. Основные типы. Аппараты с рубашками. Змеевиковые теплообменники. Кожухотрубные теплообменники. Поверхностные и смешительные теплообменники. Уравнения теплового баланса. Движущая сила стационарного процесса. Прямоток и противоток.

Массообменные процессы

Основы процессов массообмена. Общие понятия и определения. Фазовое равновесие. Материальные балансы массообменных процессов. Механизм массообменных процессов. Коэффициенты массоотдачи и массопередачи. Дифференциальные уравнения и критерии подобия массообменных процессов. Движущая сила.

Абсорбция. Устройство и принцип работы абсорберов. Поверхностные, барботажные и распылительные абсорберы. Технологические варианты процесса физической абсорбции. Неизотермическая абсорбция. Регенерация абсорбентов (десорбция). Абсорбция, сопровождаемая химической реакцией (хемосорбция).

Дистилляция и ректификация. Общие понятия.

Адсорбция. Общие понятия. Промышленные адсорбенты и их основные характеристики. Периодическая и непрерывная адсорбция

Диффузионные процессы

Математическое описание процессов диффузии. Однофазная неподвижная среда. Стационарная диффузия в движущихся средах. Диффузия в многокомпонентных системах. Диффузионный потенциал. Массопередача в диффузионных процессах. Модели массопередачи.

Химические реакторы

Классификация и типы реакторов

По принципу действия: Реакторы закрытого и полужакрытого типа. Области их применения. Проточные реакторы непрерывного действия. Реакторы емкостного и колонного типа.

По числу фаз: Гомогенные (однофазные) реакторы. Гетерогенные (многофазные) реакторы газ-твердое, газ-жидкость. Трехфазные реакторы газ-жидкость-твердый материал (катализатор, инертная насадка). Области их применения.

По состоянию фаз: Реакторы с неподвижным слоем катализатора. Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора. Барботажные реакторы. Реакторы с орошаемым слоем катализатора. Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора (газ-твердое и газ-жидкость-твердое).

По гидродинамическому режиму: Режим идеального вытеснения, идеального смешения, смешанные режимы с учетом неидеальности (напр. продольной диффузии).

По тепловому режиму: Изотермические и адиабатические реакторы. Промежуточный отвод/подвод тепла.

Гомогенные химические реакторы

Гомогенные изотермические реакторы. Классификация реакторов по гидродинамическому признаку. Реактор периодического действия. Проточный реактор с мешалкой. Каскад реакторов идеального смешения. Оптимальное соотношение объемов реакторов в каскаде. Реактор с

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

Гомогенные неизотермические реакторы. Классификация реакторов по энергетическому признаку. Адиабатические и политропические реакторы. Сравнение эффективности адиабатических и изотермических реакторов. Адиабатические и политропические реакторы с продольным перемешиванием.

Гетерогенные химические реакторы

Гетерогенные каталитические реакторы, классификация каталитических реакторов по конструктивному и гидродинамическим признакам. Одно- и многослойные реакторы со стационарным слоем катализатора. Квазигомогенная и гетерогенная модели. Автотермические каталитические реакторы. Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора. Двухфазная и трехфазная модели реактора. Реакторы с движущимся слоем катализатора. Учет изменения активности катализатора в реакторах с псевдооживленным и движущимся слоем катализатора. Понятие о многофазных каталитических реакторах. Примеры построения математических моделей расчета некоторых типов промышленных каталитических реакторов. Газожидкостные и жидкость-жидкостные реакторы. Классификация по конструктивному и гидродинамическим признакам. Реактор с мешалкой. Тарельчатые и насадочные реакторы. Модель идеального вытеснения в газовой и жидкой фазах. Особенности составления математической модели многофазного реактора. Примеры составления математических моделей и расчета некоторых типов газожидкостных реакторов. Реакторы для проведения процессов в системах газ – твердое тело. Классификация промышленных реакторов по конструктивному и гидродинамическому признакам.

Моделирование химических процессов в реакторах

Макрокинетика. Определение понятия “макрокинетика”. Составные части макрокинетической модели. Основные этапы построения. Формализм макрокинетики, основные понятия и определения. Компоненты. Фазы. Стехиометрические реакции. Сложная реакция как совокупность простых стехиометрических стадий. Стехиометрическая и атомная матрица. Баланс химических элементов. Скорость реакции и плотность источника компонента. Связь между ними. Независимые (ключевые) и зависимые источники. Связь между ними. Уравнения скорости. Закон действующих масс. Более сложные выражения для скорости реакции, выводимые на основе детального механизма. Смысл параметров кинетической модели, их зависимость от температуры. Феноменологические модели. Обратимые реакции, термодинамическая константа равновесия. Термодинамическая согласованность кинетического уравнения. Макрокинетический эксперимент, лабораторные микрореакторы, их математическое описание. Статистическая корректировка экспериментальных данных.

Идентификация кинетических моделей, параметрическая и структурная. Классические вычислительные и математические методы идентификации. Адекватная модель. Статистические свойства оценок параметров.

Процессы на пористых зернах. Модели пористой структуры. Эффективный коэффициент диффузии. Математические описания стационарного изотермического процесса для плоской пластины, шара и цилиндра на основе квазигомогенной модели. Граничные условия. Внешнедиффузионный процесс. Наблюдаемая скорость реакции. Степень использования внутренней поверхности. Влияние размера зерна. Аналитические выражения для наблюдаемой скорости и степени использования в случае простых реакций. Сложные и обратимые реакции. Диффузионная стехиометрия. Неизотермический процесс. Влияние процессов теплопереноса на степень использования внутренней поверхности.

Базовые уравнения математических моделей. Законы сохранения массы, тепла и импульса. Обобщенные уравнения Дамкелера, их физический смысл. Частные случаи, используемые на практике.

Основные принципы составления математического описания любого реактора на основе мольных балансов потоков. Переход к различным интенсивным переменным состояниям (парциальным давлениям, мольным долям, массовым долям, мольным концентрациям).

Понятия объемная скорость (space velocity), условного времени контакта (space time), способы их выражения. Выбор основных независимых переменных модели (длины реактора, условного времени контакта). Учет изменения мольного, объемного потока по мере развития реакции.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1. Рекомендуемая литература

Основная литература

- 1) Hayes R.E. Introduction to chemical reactor analysis. Gordon and Breach Science Publishers. 2001. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/Introduction%20to%20Chemical%20Reactor%20Analysis.pdf>
- 2) Бенедек П., Ласло А. Научные основы химической технологии. Л.: Химия, 1970. - 376 с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%91%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D1%8E%D0%BA%20%D0%9B%D0%B0%D1%81%D0%BB%D0%BE%20%D0%9D%D0%B0%D1%83%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8.djvu>
- 3) Бесков В.С., Сафронов В.С. Общая химическая технология и основы промышленной экологии. – М.: Химия, 1999. – 472 с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%91%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%A1.,%20%D0%A1%D0%B0%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%A1.%20%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B0%D1%8F%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D1%8D%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8.djvu>
- 4) Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Книги 1 и 2. Москва, Химия, 1981. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BD%20%D0%9A%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%B0%D1%8F.djvu; https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BD%20%D0%9A%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0%20%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%8F.djvu>
- 5) Йоффе И.И., Письмен Л.М. Инженерная химия гетерогенного катализа. – Л.: Химия, 1972. – 462 с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BD%20%D0%9A%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0%20%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%8F.djvu>

- [8%D1%82-
%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%99%D0%BE%D1%84%D1%84%D0%B5%20%D0%98.%D0%98.,%20%D0%9F%D0%B8%D1%81%D1%8C%D0%BC%D0%B5%D0%BD%20%D0%9B.%D0%9C.%20%D0%98%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F%20%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0.djvu](https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%99%D0%BE%D1%84%D1%84%D0%B5%20%D0%98.%D0%98.,%20%D0%9F%D0%B8%D1%81%D1%8C%D0%BC%D0%B5%D0%BD%20%D0%9B.%D0%9C.%20%D0%98%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F%20%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0.djvu)
- 6) Арис Р. Анализ процессов в химических реакторах. – Л.: Химия, 1967. – 328 с. Режим доступа:
[https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-
%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%90%D1%80%D0%B8%D0%B7%20%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%B2%20%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%85.djvu](https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%90%D1%80%D0%B8%D0%B7%20%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%B2%20%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%85.djvu)
- 7) Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969. – 624 с. Режим доступа:
[https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-
%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9B%D0%B5%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D1%8C%20%D0%98%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5%20%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2.djvu](https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9B%D0%B5%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D1%8C%20%D0%98%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5%20%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2.djvu)
- 8) Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991, - 400 с. Режим доступа:
[https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-
%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9A%D0%B0%D1%84%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%92.,%20%D0%93%D0%BB%D0%B5%D0%B1%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C.%D0%91.%20%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2.djvu](https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9A%D0%B0%D1%84%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%92.,%20%D0%93%D0%BB%D0%B5%D0%B1%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C.%D0%91.%20%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2.djvu)
- 9) Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с. Режим доступа:
[https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-
%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%A4%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BA-%D0%9A%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%86%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D0%94.%D0%90.%20%D0%94%D0%B8%D1%84%D1%84%D1%83%D0%B7%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0%20%D0%B2%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B5.djvu](https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%A4%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BA-%D0%9A%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%86%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D0%94.%D0%90.%20%D0%94%D0%B8%D1%84%D1%84%D1%83%D0%B7%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0%20%D0%B2%20%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B5.djvu)

- 10) Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. Изд. 3-е, пер. и доп. М.: Химия, 1975. – 584 с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BF%D0%B5%D1%82%D1%8F%D0%BD%D1%86%20%D0%9C.%D0%A5.%20%D0%A5%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0.pdf>
- 11) Термодинамика равновесия жидкость-пар. Под ред. А.Г. Морачевского. Л.:Химия, 1989, - 344 с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9C%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%81%D0%B8%D1%8F%20%D0%B6%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%20-%20%D0%BF%D0%B0%D1%80.djvu>
- 12) Малиновская О.А., Бесков В.С., Слинко М.Г. Моделирование каталитических процессов на пористых зернах. Изд. Наука, Сибирское отделение. 1975. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%9E.%D0%90.%20%D0%91%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%A1.%20%D0%A1%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D1%8C%D0%BA%D0%BE%20%D0%9C.%D0%93.%20%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%BD%D0%B0%20%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%8B%D1%85%20%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%85.djvu>
- 13) Ермакова А. Методы макрокинетики, применяемые при математическом моделировании химических процессов и реакторов. Учебное пособие. Новосибирск, Институт катализа РАН им. Г.К. Борескова. 2001 г. 184 с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%95%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8.djvu>
- 14) Ермакова А. Методы прикладной термодинамики, применяемые при математическом моделировании химических процессов и реакторов. Учебное пособие. Новосибирск, Институт катализа РАН им. Г.К. Борескова. 2002 г. 213с. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/%D0%95%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%B%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B8.djvu>

Дополнительная литература

- 15) R. Aris, Ends and beginnings in the mathematical modelling of chemical engineering systems, Chemical Engineering Science, v. 48, No 14, pp. 2507-2517, 1993. Режим доступа: <https://www.catalysis.ru/resources/education/%D1%80%D0%B5%D0%BA.%20%D0%BB%D0%B8%D1%82-%D1%80%D0%B0%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/aris1993.pdf>

8.2. Информационные ресурсы

Примеры задач письменной контрольной работы: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=5&SECTION_ID=418

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Аудиторный фонд ИК СО РАН, ноутбук, мультимедиа проектор, экран.
- Компьютерный класс ИК СО РАН, электронно-вычислительные машины, оснащенные необходимым прикладным и специализированным программным обеспечением.
- Рабочие места с выходом в интернет и внутреннюю сеть ИК СО РАН.
- Библиотечный фонд, информационно-аналитический центр ИК СО РАН.
- Учебные материалы на сайте ИК СО РАН www.catalysis.ru (Раздел Образование).

10. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме кандидатского экзамена, состоящего из двух этапов: письменной контрольной работы, являющейся допуском ко второму этапу экзамена, и устной части экзамена. Письменная контрольная работа оценивается по шкале «неудовлетворительно» (менее 50 баллов), «удовлетворительно» (50 – 65 баллов), «хорошо» (65 – 80 баллов), «отлично» (80 – 100 баллов). Получение аспирантом оценок «удовлетворительно», «хорошо», «отлично» за письменную контрольную работу является допуском к прохождению устной части экзамена. Устная часть экзамена оценивается по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Итоговая оценка за кандидатский экзамен является средним арифметическим оценок, полученных при оценивании контрольной работы и устного ответа аспиранта. Получение аспирантом оценки «неудовлетворительно» по одному из этапов экзамена автоматически означает получение оценки «неудовлетворительно» за кандидатский экзамен и признается академической задолженностью.

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ В РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ ЗА _____/_____ УЧЕБНЫЙ ГОД

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
«Институт катализа им. Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук»
(ИК СО РАН, Институт катализа СО РАН)



УТВЕРЖДАЮ
Директор, академик РАН
В.И. Бухтияров

« 15 » сентября 20 22 г.

Фонд оценочных средств по дисциплине
Б1.ОД.4 Процессы и аппараты химических технологий

Научная специальность: 2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий

Направленность: Процессы и аппараты химических технологий

Новосибирск, 2022

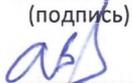
Фонд оценочных средств является Приложением 1 к рабочей программе дисциплины «Процессы и аппараты химических технологий», реализуемой в рамках программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий, направленность Процессы и аппараты химических технологий.

Составители фонда оценочных средств:

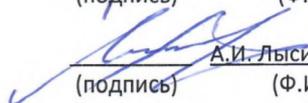
Старший научный сотрудник, к.т.н.
(должность, ученое звание, ученая степень)


(подпись) Н.В. Верниковская
(Ф.И.О.)

Ведущий научный сотрудник, д.т.н.
(должность, ученое звание, ученая степень)


(подпись) А.Н. Загоруйко
(Ф.И.О.)

Научный сотрудник, к.х.н.
(должность, ученое звание, ученая степень)


(подпись) А.И. Лысиков
(Ф.И.О.)

Фонд оценочных средств утвержден на заседании Ученого совета ИК СО РАН
«15» апреля 2022 г., протокол № 6

Ученый секретарь,
к.х.н.


(подпись) М.О. Казаков
(Ф.И.О.)

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора по научной работе,
д.х.н.


(подпись) О.Н. Мартьянов
(Ф.И.О.)

1. Промежуточная аттестация по дисциплине «Процессы и аппараты химических технологий»

1.1. Общая характеристика промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация по дисциплине «Процессы и аппараты химических технологий» нацелена на проверку уровня сформированности следующих компетенций:

Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности

Применять фундаментальные знания в области физической адсорбции для решения научных и практических задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратов на основе адсорбционных процессов
--

Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области приготовления катализаторов, адсорбентов и носителей для решения задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности

1.2. Порядок проведения промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме кандидатского экзамена, состоящего из двух этапов: письменной контрольной работы, являющейся допуском ко второму этапу экзамена, и устной части экзамена. Письменная контрольная работа оценивается по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Получение аспирантом оценок «удовлетворительно», «хорошо», «отлично» за письменную контрольную работу является допуском к прохождению устной части экзамена. Устная часть экзамена оценивается по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Итоговая оценка за кандидатский экзамен является средним арифметическим оценок, полученных при оценивании контрольной работы и устного ответа аспиранта. Получение аспирантом оценки «неудовлетворительно» по одному из этапов экзамена автоматически означает получение оценки «неудовлетворительно» за кандидатский экзамен и признается академической задолженностью.

1.3. Письменная контрольная работа

Письменная контрольная работа состоит из оригинальных задач, ежегодно составляемых преподавателями дисциплины. Задачи контрольной работы позволяют определить уровень сформированности следующих компетенций: «способность к использованию профильно-специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности», «применять фундаментальные знания в области физической адсорбции для решения научных и практических задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратов на основе адсорбционных процессов», «способность к использованию профильно-специализированных знаний в области приготовления катализаторов, адсорбентов и носителей для решения задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности».

Типичные задачи контрольных работ представлены в таблице.

Компетенция	Текст задачи
Способность к использованию профильно-специализированных	Каталитический процесс синтеза аммиака, протекающий согласно уравнению реакции $0.5 \text{ N}_2 + 1.5 \text{ H}_2 = \text{NH}_3$, осуществляют при постоянных температуре (400 °С) и давлении (330 атм). Определите

<p>знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности</p>	<p>мольную долю аммиака в равновесной смеси, если исходно в реактор подаётся стехиометрическая смесь азота с водородом. Изменение стандартной энергии Гиббса для данной реакции зависит от температуры (K) следующим образом: $\Delta_r G^0(T) = -37913 + 72.68 \cdot T \cdot \lg T - 16.62 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 1.4 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 102.62 \cdot T$ (Дж/моль). K_p для данной реакции равна 0.69.</p>
	<p>Лимитирующей стадией каталитической полимеризации этилена является рост полимерной цепи на активном центре (M-P): $M-P + C_2H_4 \rightarrow M-(C_2H_4)-P$ Для определения числа активных центров пользуют ингибирование активного центра радиоактивной меткой (CO). Для этого в реактор вводят избыток радиоактивного ^{14}CO, который быстро реагирует с активными центрами M-P с образованием частиц M-(^{14}CO)-P: $M-P + ^{14}CO \rightarrow M-(^{14}CO)-P$ При этом рост цепи прекращается. В реактор загрузили 2×10^{-6} моль комплекса двухвалентного кобальта и запустили процесс полимеризации. Через 5 минут в систему ввели избыток меченного ^{14}CO. Масса полученного полимерного продукта составила 3 г. Определите долю кобальта в активном состоянии, если отношение удельной радиоактивности полимера A (распадов на 1 грамм полимера) к радиоактивности использованной метки Q (распадов на 1 моль ^{14}CO) составило $A/Q = 2 \times 10^{-7}$ (грамм полимера/моль ^{14}CO).</p>
	<p>Ферментативная реакция протекает согласно схеме Михаэлиса-Ментен:</p> $E + S \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} ES \xrightarrow{k_2} E + P, \quad \text{где}$ $K_m = \frac{k_{-1} + k_2}{k_1} = 0,035 \text{ моль / л.}$ <p>При начальных концентрациях субстрата $[S]_0 = 0,115 \text{ моль/л}$ и фермента $[E]_0 = 5,50 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л}$ значение стационарной скорости в начальный момент времени составляет $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ моль/(л \cdot с)}$. Найдите максимальное значение стационарной скорости процесса для приведенной начальной концентрации фермента.</p>
	<p>Последовательную реакцию $A \rightarrow B \rightarrow C$ проводят в реакторе идеального смешения при времени контакта $\tau = 1 \text{ с}$, $[A]_0 = a$. Уменьшение скорости подачи реагента A в 4 раза привело к удвоению степени превращения XA и не повлияло на стационарную концентрацию $[B]_{\text{стац}}$ в реакторе. Определите по этим данным k_1, k_2 и оптимальное время контакта $\tau_{\text{опт}}$, при котором достигается максимальная концентрация B.</p>
	<p>Автокаталитическую реакцию $A + B \rightarrow 2B$ проводят в цилиндрическом реакторе идеального вытеснения диаметром 21 мм и длиной 0.5 м. Начальные условия: $k = 2 \text{ М}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, скорость подачи смеси $U = 90 \text{ л/ч}$, $[A]_0 + [B]_0 = 0.1 \text{ М}$. При каком начальном соотношении $\gamma = ([A]_0/[B]_0)$ будет наблюдаться максимальная скорость образования B на выходе из реактора? Какова конверсия A в этих условиях?</p>
<p>В реакторе вытеснения протекает каталитический процесс $A \rightarrow B$. Определите степень превращения вещества A в приближении</p>	

	<p>реактора идеального вытеснения при условии, что давление между входом и выходом из реактора изменяется линейно из-за гидравлического сопротивления слоя катализатора.</p> <p>Известно, что объёмная скорость газовой смеси на выходе из реактора равна 10 мл/мин, давление на выходе из реактора составляет 1 атм, сопротивление слоя катализатора равно 3 атм, контактный объём реактора равен 0.1 см³. Реакцию A→B считайте простой с $k = 0.2 \text{ с}^{-1}$.</p>
<p>Применять фундаментальные знания в области физической адсорбции для решения научных и практических задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратов на основе адсорбционных процессов</p>	<p>Адсорбция аргона на поверхности мезопористого Сибунита описывается моделью Лэнгмюра. Выведите уравнение изостеры адсорбции Лэнгмюра и определите зависимость изостерической теплоты адсорбции от степени заполнения поверхности.</p> <p>Адсорбция СО на поверхности палладия описывается уравнением:</p> $1) \text{CO} + [\text{Pd}] \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} \text{CO}_{\text{Pd}}$ <p>Из-за большой теплоты адсорбции СО при низких температурах степень заполнения $\text{CO}=1$. Так, что даже в избытке кислорода окисление СО на палладии подавлено.</p> <p>Оцените теплоту адсорбции СО на поверхности палладия и средний радиус частиц Pd в катализаторе Pd/Al₂O₃, если известно, что: 1) теплота эмпирически зависит от радиуса частиц по уравнению: $Q(R) \approx Q_0 \frac{R}{1+R}$, где Q_0 – теплота адсорбции СО на массивном палладии (кДж/моль), R – радиус частицы (Å).</p> <p>2) Окисление начинается, если доля свободной поверхности составляет более 10⁻⁷.</p> <p>3) Окисление на палладиевой фольге и на катализаторе Pd/Al₂O₃ начинается при температурах 220 °С и 150 °С соответственно для $P_{\text{CO}} = 1$ торр.</p> <p>В оценках принять, что коэффициент прилипания СО = 1, частота свободного колебания СО на поверхности 10¹³ с⁻¹, а концентрация посадочных мест на поверхности 10¹⁵ см⁻².</p>
<p>Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области приготовления катализаторов, адсорбентов и носителей для решения задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности</p>	<p>Композиционный сорбент для СО₂ представляет собой СаО, равномерно покрывающий поверхность пор матрицы слоистого материала. Поры имеют бимодальное распределение по размерам: $V_1=0.5 \text{ г/см}^3$, $S_1=150 \text{ м}^2/\text{г}$; $V_2=0.1 \text{ г/см}^3$, $S_2=80 \text{ м}^2/\text{г}$. Каково допустимо максимальное весовое содержание СаО в образце, при котором не происходит разрушения матрицы в случае полного перехода оксида в карбонат кальция? Плотность СаСО₃ – 2.71 г/см³, СаО – 3.4 г/см³.</p> <p>При приготовлении катализатора методом пропитки с последующей сушкой (предшественник не сорбируется на поверхности носителя) обнаружилось, что нанесение активного компонента после однократной пропитки приводит к распределению массы активного компонента: 2/3 сосредоточено в корочке зерен носителя в виде крупных частиц, 1/3 – внутри зёрен в высокодисперсной форме в тупиковых порах. Было решено: приготовить катализатор двумя пропитками с промежуточным превращением нанесенного вещества в нерастворимую форму вдвое разбавленным раствором активного компонента. Как изменится распределение массы активного компонента по зерну носителя в этом случае и во сколько раз возрастет дисперсность</p>

	<p>второго катализатора относительно первого? Текстуальные характеристики носителя и катализаторов в ходе приготовления не изменяются.</p>
	<p>Образец NiO/NiAl₂O₄ (10 вес% избыточного NiO) получают соосаждением гидроокисей металлов при pH 7 из растворов их нитратов при действии щёлочи с последующим прокаливанием осадка.</p> <p>Сколько граммов Al(NO₃)₃·9H₂O и Ni(NO₃)₂·6H₂O необходимо взять, чтобы получить 10 г образца, если объём жидкости после отделения осадка составит 200 мл.</p> <p>$PAI(OH)_3 = 10^{(-32)}$, атомный вес Al = 27 уе $PNi(OH)_2 = 10^{(-15)}$, атомный вес Ni = 58.7 уе</p> <p>Влиянием ионной силы раствора пренебречь.</p>
	<p>При приготовлении углерод-минерального композита использовали мезопористые уголь (истинная плотность 1.5 г/см³, удельная поверхность 400 м²/г, объём мезопор 1.0 см³/г) и оксид алюминия (истинная плотность 3.2 г/см³, удельная поверхность 200 м²/г, объём мезопор 0.3 см³/г). Рассчитайте истинную и насыпную плотность, удельную поверхность и объём мезопор полученного композита, содержащего равные массовые доли исходных компонентов.</p>

1.4. Устная часть экзамена

Вопросы к устной части экзамена нацелены на проверку сформированности компетенции: «способность к использованию профильно-специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурс- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности». На экзамене случайным образом выбираются три вопроса, проверяющих уровень сформированности данной компетенции. Примеры вопросов устного экзамена приведены в таблице.

Компетенция	Вопросы
Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурс- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности	Основные принципы системного анализа; взаимосвязь явлений в отдельных процессах и аппаратах; иерархия явлений и их соподчиненность в изучении процессов и аппаратов; иерархическая структура химического производства; взаимовлияние аппаратов.
	Математическое моделирование как современный метод анализа и синтеза химико-технологических процессов и химико-технологических систем. Сущность и цели математического моделирования объектов химической технологии, формы представления информации о процессе (управления, регрессии, дифференциальные уравнения, интегральные уравнения, конечные и конечно-разностные уравнения).
	Постановка задачи математического описания процесса. Два подхода к составлению математической модели процесса: детерминированный и стохастический. Их возможности и сферы использования.
	Теория подобия и анализ размерностей. Подобные преобразования, физическое моделирование, метода характеристических масштабов. Основы теории переноса количества движения, энергии, массы; гидродинамика и гидродинамические процессы: основные уравнения движения жидкостей, гидродинамическая структура потоков.
	Модель идеального смешения. Вывод дифференциального уравнения модели. Условия реализуемости принятых допущений в приложении к аппаратам химической технологии.

<p>Модель идеального вытеснения. Вывод дифференциального уравнения модели.</p>
<p>Сравнительная оценка идеальных моделей. Диффузионная модель. Последовательное и параллельное включение ячеек идеального смещения и вытеснения.</p>
<p>Система. Состояние системы. Уравнения состояния. Энергия. Работа. Теплота. Нулевой и первый законы термодинамики. Основные законы термодинамики. О равновесных и обратимых процессах. Второй и третий законы термодинамики. Переменные состояния. Экстенсивные и интенсивные свойства. Характеристические уравнения состояния. Закрытые системы. Открытые системы, химический потенциал. Определение. Парциальные мольные величины. Реальные системы. Фугитивность, активность. Уравнения состояния. Гомогенные и гетерогенные системы. Фаза.</p>
<p>Химическое равновесие. Закон действующих масс. Условия химического равновесия. Математическая модель химического равновесия. Константа химического равновесия, различные формы ее выражения и связь между ними. Основы расчета равновесного состава многокомпонентной реагирующей смеси без использования детерминированных химических реакций. Балансовые ограничения. Расчет равновесного состава с использованием детерминированных химических реакций. Балансовые ограничения. Зависимость равновесного состава от температуры и давления. Изотермическое и адиабатическое равновесие.</p>
<p>Термодинамика фазовых равновесий. Идеальные и реальные системы. Законы Генри, Рауля, области их применимости. Молярная свободная энергия Гиббса и фугитивность чистого компонента. Современные уравнения состояния реальных газов и жидкостей. Химический потенциал чистого компонента и компонентов смеси.</p>
<p>Расчет термодинамических свойств многокомпонентной смеси (энтальпии, теплоемкости, энтропии) с использованием современных уравнений состояния. Фазовые диаграммы многокомпонентной смеси на плоскости P-T и на плоскости P-V. Характерные граничные линии (бинодаль, спинодаль), их физический смысл и практическое значение. Характерные особые точки (критическая точка).</p>
<p>Основные понятия и определения. Температура. Теплообмен. Теплопроводность. Конвективный перенос тепла. Тепловой поток. Уравнение Фурье. Коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи. Свободная конвекция. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Критерии подобия процессов конвективного теплообмена. Теплоотдача в дисперсных системах с твердой фазой. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния веществ (кипение и испарение, конденсация).</p>
<p>Теплообменные аппараты. Назначение и классификация. Основные типы. Аппараты с рубашками. Змеевиковые теплообменники. Кожухотрубные теплообменники. Поверхностные и смесительные теплообменники. Уравнения теплового баланса. Движущая сила стационарного процесса. Прямоток и противоток.</p>
<p>Основы процессов массообмена. Общие понятия и определения. Фазовое равновесие. Материальные балансы массообменных процессов. Механизм массообменных процессов. Коэффициенты массоотдачи и массопередачи. Дифференциальные уравнения и критерии подобия массообменных процессов. Движущая сила.</p>
<p>Абсорбция. Устройство и принцип работы абсорберов. Поверхностные, барботажные и распылительные абсорберы. Технологические варианты</p>

<p>процесса физической абсорбции. Неизотермическая абсорбция. Регенерация абсорбентов (десорбция). Абсорбция, сопровождаемая химической реакцией (хемосорбция).</p>
<p>Дистилляция и ректификация. Общие понятия.</p>
<p>Адсорбция. Общие понятия. Промышленные адсорбенты и их основные характеристики. Периодическая и непрерывная адсорбция</p>
<p>Математическое описание процессов диффузии. Однофазная неподвижная среда. Стационарная диффузия в движущихся средах. Диффузия в многокомпонентных системах. Диффузионный потенциал. Массопередача в диффузионных процессах. Модели массопередачи.</p>
<p>Изотермические и адиабатические реакторы. Промежуточный отвод/подвод тепла.</p>
<p>Гомогенные (однофазные) реакторы. Гетерогенные (многофазные) реакторы газ-твердое, газ-жидкость. Трехфазные реакторы газ-жидкость-твердый материал (катализатор, инертная насадка). Области их применения.</p>
<p>Реакторы с неподвижным слоем катализатора. Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора. Барботажные реакторы. Реакторы с орошаемым слоем катализатора. Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора (газ-твердое и газ-жидкость-твердое).</p>
<p>Реакторы закрытого и полужакрытого типа. Области их применения. Проточные реакторы непрерывного действия. Реакторы емкостного и колонного типа.</p>
<p>Режим идеального вытеснения, идеального смешения, смешанные режимы с учетом неидеальности (напр. продольной диффузии).</p>
<p>Гомогенные изотермические реакторы. Классификация реакторов по гидродинамическому признаку. Реактор периодического действия. Проточный реактор с мешалкой. Каскад реакторов идеального смешения. Оптимальное соотношение объемов реакторов в каскаде. Реактор с продольным перемешиванием потока (ламинарный и турбулентный режимы). Выбор типа реактора с учетом селективности реакции.</p>
<p>Гомогенные неизотермические реакторы. Классификация реакторов по энергетическому признаку. Адиабатические и политропические реакторы. Сравнение эффективности адиабатических и изотермических реакторов. Адиабатические и политропические реакторы с продольным перемешиванием.</p>
<p>Гетерогенные каталитические реакторы, классификация каталитических реакторов по конструктивному и гидродинамическим признакам. Одно- и многослойные реакторы со стационарным слоем катализатора.</p>
<p>Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора. Двухфазная и трехфазная модели реактора.</p>
<p>Реакторы с движущимся слоем катализатора. Учет изменения активности катализатора в реакторах с псевдооживленным и движущимся слоем катализатора. Понятие о многофазных каталитических реакторах.</p>
<p>Квазигомогенная и гетерогенная модели. Автотермические каталитические реакторы. Примеры построения математических моделей расчета некоторых типов промышленных каталитических реакторов. Газожидкостные и жидкость-жидкостные реакторы.</p>
<p>Классификация по конструктивному и гидродинамическим признакам. Реактор с мешалкой. Тарельчатые и насадочные реакторы.</p>
<p>Модель идеального вытеснения в газовой и жидкой фазах. Особенности составления математической модели многофазного реактора.</p>
<p>Примеры составления математических моделей и расчета некоторых</p>

типов газожидкостных реакторов.
Реакторы для проведения процессов в системах газ – твердое тело.
Классификация промышленных реакторов по конструктивному и гидродинамическому признакам.
Макрокинетика. Определение понятия “макрокинетика”. Составные части макрокинетической модели. Основные этапы построения. Формализм макрокинетики, основные понятия и определения. Компоненты. Фазы.
Стехиометрические реакции. Сложная реакция как совокупность простых стехиометрических стадий. Стехиометрическая и атомная матрица. Баланс химических элементов. Скорость реакции и плотность источника компонента. Связь между ними. Независимые (ключевые) и зависимые источники. Связь между ними.
Уравнения скорости. Закон действующих масс. Более сложные выражения для скорости реакции, выводимые на основе детального механизма. Смысл параметров кинетической модели, их зависимость от температуры. Феноменологические модели. Обратимые реакции, термодинамическая константа равновесия. Термодинамическая согласованность кинетического уравнения. Макрокинетический эксперимент, лабораторные микрореакторы, их математическое описание. Статистическая корректировка экспериментальных данных.
Идентификация кинетических моделей, параметрическая и структурная. Классические вычислительные и математические методы идентификации. Адекватная модель. Статистические свойства оценок параметров.
Процессы на пористых зернах. Модели пористой структуры. Эффективный коэффициент диффузии. Математические описания стационарного изотермического процесса для плоской пластины, шара и цилиндра на основе квазигомогенной модели. Граничные условия.
Внешнедиффузионный процесс. Наблюдаемая скорость реакции. Степень использования внутренней поверхности. Влияние размера зерна. Аналитические выражения для наблюдаемой скорости и степени использования в случае простых реакций. Сложные и обратимые реакции. Диффузионная стехиометрия. Неизотермический процесс. Влияние процессов теплопереноса на степень использования внутренней поверхности.
Базовые уравнения математических моделей. Законы сохранения массы, тепла и импульса. Обобщенные уравнения Дамкелера, их физический смысл. Частные случаи, используемые на практике.
Основные принципы составления математического описания любого реактора на основе мольных балансов потоков. Переход к различным интенсивным переменным состояниям (парциальным давлениям, мольным долям, массовым долям, мольным концентрациям).
Понятия объемная скорость (space velocity), условного времени контакта (space time), способы их выражения. Выбор основных независимых переменных модели (длины реактора, условного времени контакта). Учет изменения мольного, объемного потока по мере развития реакции.

3. Критерии оценки сформированности компетенций в рамках промежуточной аттестации по дисциплине

Компетенции	Оценочное средство	Не сформирован	Пороговый уровень	Базовый уровень	Продвинутый уровень
Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности	Задачи письменной контрольной работы, вопросы устного этапа экзамен	Демонстрирует общие знания физической химии, катализа и тепло- и массопереноса, испытывает видимые затруднения при составлении математических моделей для расчета каталитических процессов и реакторов	Демонстрирует общие знания физической химии, катализа и тепло- и массопереноса, испытывает затруднения при составлении математических моделей для расчета каталитических процессов и реакторов	Демонстрирует знания физической химии, катализа и тепло- и массопереноса, допускает небольшие неточности при составлении математических моделей для расчета каталитических процессов и реакторов	Демонстрирует глубокие знания физической химии, катализа и тепло- и массопереноса, правильно составляет математические модели для расчета каталитических процессов и реакторов
Применять фундаментальные знания в области физической адсорбции для решения научных и практических задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратов на основе адсорбционных процессов	Задача письменной контрольной работы	Демонстрирует знания физико-химических основ адсорбционных равновесий, допускает грубые ошибки при решении задач, возникающих в профессиональной сфере	Демонстрирует знания физико-химических основ адсорбционных равновесий, допускает негрубые ошибки при решении задач, возникающих в профессиональной сфере	Демонстрирует знания физико-химических основ адсорбционных равновесий, допускает несущественные ошибки при решении задач, возникающих в профессиональной сфере	Демонстрирует глубокие знания физико-химических основ адсорбционных равновесий, обоснованно применяет эти знания для решения задач, возникающих в профессиональной сфере
Способность к использованию профильно-специализированных знаний в области приготовления катализаторов, адсорбентов и носителей для решения задач,	Задача письменной контрольной работы	Демонстрирует знания в области приготовления катализаторов, допускает грубые ошибки при решении	Демонстрирует знания в области приготовления катализаторов, допускает негрубые ошибки при решении	Демонстрирует знания в области приготовления катализаторов, допускает	Демонстрирует глубокие знания в области приготовления катализаторов,

возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности		задач, возникающих в профессиональной сфере	задач, возникающих в профессиональной сфере	несущественные ошибки при решении задач, возникающих в профессиональной сфере	обоснованно применяет эти знания для решения задач, возникающих в профессиональной сфере
---	--	---	---	---	--

Для успешного прохождения промежуточной аттестации все компетенции должны быть сформированы на уровне не ниже порогового.

4. Критерии оценивания промежуточной аттестации аспиранта

Итоговая оценка за кандидатский экзамен является средним арифметическим оценок, полученных при оценивании степени освоения проверяемых компетенций на этапах письменной контрольной работы и устного экзамена. Получение аспирантом оценки «неудовлетворительно» по одному из этапов экзамена автоматически означает получение оценки «неудовлетворительно» за кандидатский экзамен и признается академической задолженностью.

Критерии оценивания контрольной работы:

- «неудовлетворительно» - допускает грубые ошибки в терминологии, ключевых формулах и математических вычислениях, набирает менее 50 баллов за работу;
- «удовлетворительно» - демонстрирует слабое владение знаниями физико-химических основами катализа, адсорбционных явлений и приготовления катализаторов, допускает ошибки при написании ключевых формул и вычислении целевых значений, набирает от 50 до 65 баллов за работу;
- «хорошо» - демонстрирует владение знаниями физико-химических основами катализа, адсорбционных явлений и приготовления катализаторов не в полной степени, верно записывает ключевые формулы, допускает несущественные ошибки при вычислении целевых значений, набирает от 65 до 80 баллов за работу;
- «отлично» - демонстрирует уверенное владение знаниями физико-химических основами катализа, адсорбционных явлений и приготовления катализаторов, верно записывает ключевые формулы, не допускает ошибок при вычислении целевых значений; набирает от 80 до 100 баллов за работу.

Критерии оценивания ответа аспиранта на экзамене:

- «неудовлетворительно» - нет ответов более, чем на половину заданных вопросов, допущены грубые ошибки при описании физики-химических явлений и технологических принципов построения моделей процессов и аппаратов;
- «удовлетворительно» - ответы в целом правильные, продемонстрировано общее понимание физики-химических явлений и технологических принципов построения моделей процессов и аппаратов, имеются негрубые ошибки и неточности в формулировках;
- «хорошо» - ответы правильные, грамотные, продемонстрировано понимание физико-химических явлений и технологических принципов построения моделей процессов и аппаратов, имеются несущественные ошибки и неточности в формулировках;
- «отлично» - ответы полные, исчерпывающие, продемонстрировано понимание физико-химических явлений и технологических принципов построения моделей процессов и аппаратов.

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ В ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ» ЗА _____/_____ УЧЕБНЫЙ ГОД