



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.
Носова»



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИММиМ
А.С. Савинов
05.02.2026 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Направление подготовки (специальность)
18.03.01 Химическая технология

Направленность (профиль/специализация) программы
Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов

Уровень высшего образования - бакалавриат

Форма обучения
очная

Институт/ факультет	Институт металлургии, машиностроения и материалообработки
Кафедра	Металлургии и химических технологий
Курс	3
Семестр	5

Магнитогорск
2026 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО - бакалавриат по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология (приказ Минобрнауки России от 07.08.2020 г. № 922)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры
Металлургии и химических технологий
28.01.2026, протокол № 4

Зав. кафедрой

А.С. Харченко

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИММиМ
05.02.2026 г. протокол № 5

Председатель

А.С. Савинов

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры кафедры МиХТ, канд. хим. наук

С.А. Крылова

Рецензент:

доцент кафедры Химии, канд. хим. наук

Е.В. Тарасюк

Лист актуализации рабочей программы

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2027 - 2028 учебном году на заседании кафедры Металлургии и химических технологий

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.С. Харченко

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2028 - 2029 учебном году на заседании кафедры Металлургии и химических технологий

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.С. Харченко

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2029 - 2030 учебном году на заседании кафедры Металлургии и химических технологий

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.С. Харченко

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2030 - 2031 учебном году на заседании кафедры Металлургии и химических технологий

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.С. Харченко

1 Цели освоения дисциплины (модуля)

получение студентами знаний по теоретическим основам химических реакторов и протекающих в них процессах, а также практических умений и навыков при рассмотрении типовых конструкций химических реакторов, составлении математического описания протекающих в них процессов, анализе результатов расчёта реакторов.

2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Химические реакторы входит в обязательную часть учебного плана образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Техническая термодинамика и теплотехника

Общая химическая технология

Физическая химия

Математика

Общая и неорганическая химия

Физика

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Планирование эксперимента и моделирование химико-технологических процессов

3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Химические реакторы» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции
ОПК-4	Способен обеспечивать проведение технологического процесса, использовать технические средства для контроля параметров технологического процесса, свойств сырья и готовой продукции, осуществлять изменение параметров технологического процесса при изменении свойств сырья
ОПК-4.1	Определяет технические средства на производстве для обеспечения технологических процессов
ОПК-4.2	Оценивает и контролирует параметры и эффективность технологических процессов, свойства сырья и готовой продукции в области химической технологии
ОПК-4.3	Прогнозирует и регулирует изменение параметров технологических процессов в зависимости от свойств сырья

4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц 144 академических часов, в том числе:

- контактная работа – 76,1 академических часов;
- аудиторная – 72 академических часов;
- внеаудиторная – 4,1 академических часов;
- самостоятельная работа – 32,2 академических часов;
- в форме практической подготовки – 0 академических часов;
- подготовка к экзамену – 35,7 академических часов

Форма аттестации - экзамен

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в академических часах)			Самостоятельная работа студента	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код компетенции
		Лек.	лаб. зан.	практ. зан.				
1. Введение								
1.1 Показатели эффективности работы реакторов и ХТП. Классификация реакторов и режимов их работы	5	2		2	0,5	Работа с конспектом	Конспект Зачет	ОПК-4.2, ОПК-4.3, ОПК-4.1
Итого по разделу		2		2	0,5			
2. Математическое моделирование химических процессов и реакторов								
2.1 Модель реактора идеального смешения периодического действия.	5	3		4	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест, Зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
2.2 Модель реактора идеального смешения непрерывного действия		2		6	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест, Зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
2.3 Модель реактора идеального вытеснения непрерывного действия		2		4	2	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы.	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3

						- Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Тест,зачет	
Итого по разделу		7		14	10			
3. Изотермический гомогенный процесс в химическом реакторе								
3.1 Анализ процесса в химическом реакторе.	5	5		4	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест,зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
3.2 Сравнение эффективности работы изотермических реакторов. Каскад реакторов идеального смешения		2		2	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест,зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		7		6	8			
4. Гетерогенный процесс в химическом реакторе								
4.1 Режим и лимитирующие стадии процесса. Общие принципы управления скоростью гетерогенного процесса.	5	4		2	3,5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиуму) тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест,зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
4.2 Система «газ (жидкость) – твердое (не полностью реагирующее)». Система «газ (жидкость) - твердое (полностью реагирующее)».		6		4	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиуму), тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест,зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		10		6	7,5			
5. Неизотермический процесс в химическом реакторе.								
5.1 Режимы идеального смешения периодический и идеального вытеснения с теплообменом	5	4		4	2	Самостоятельное изучение учебной и научной	Выступление на семинаре, выполнение расчетных	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3

						литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиу- му),тестировани ю	заданий Тест,зачет	
5.2 Температурный режим в проточном реакторе идеального смешения Сопоставление адиабатического процесса в проточных режимах идеального смешения и вытеснения	5	6		4	4,2	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиу- му),тестировани ю	Выступление на семи-наре, выполнение расчетных заданий Тест,зачет	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		10		8	6,2			
Итого за семестр		36		36	32,2		экзамен	
Итого по дисциплине		36		36	32,2		экзамен	

5 Образовательные технологии

Проектирование обучения строится на основе следующих принципов:

- Обучение на основе интеграции с наукой и производством.
- Профессионально-творческая направленность обучения.
- Ориентированность обучения на личность.
- Ориентированность обучения на развитие опыта самообразовательной деятельности будущего специалиста.

Для достижения планируемых результатов обучения, в дисциплине «Химические реакторы» используются различные образовательные технологии:

1. Традиционные образовательные технологии: информационная лекция, практические занятия.
2. Информационно-коммуникационные образовательные технологии: лекция-визуализация. Практическое занятие в форме презентации – представление результатов с использованием специализированных программных сред.
3. Информационно-развивающие технологии, направленные на формирование системы знаний, запоминание и свободное оперирование ими. При самостоятельном изучении литературы применение современных информационных технологий для самостоятельного пополнения знаний, включая использование технических и электронных средств информации.
4. Деятельностные практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений при разборе конкретных ситуаций, основанных на практических примерах, обеспечивающих возможность качественно выполнять профессиональную деятельность.
5. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие проблемного мышления, мыслительной активности, способности видеть и формулировать проблемы, выбирать способы и средства для их решения.
6. Интерактивные технологии: коллективное обсуждение какого-либо спорного вопроса, проблемы, выявление мнений в группе. Изложение проблем и их совместное решение.
7. Личностно-ориентированные технологии обучения, обеспечивающие в ходе учебного процесса учет различных способностей обучаемых, создание необходимых условий для развития их индивидуальных способностей, развитие активности личности в учебном процессе. Личностно-ориентированные технологии обучения реализуются в результате индивидуального общения преподавателя и студента.

В ходе диалогового обучения студенты учатся критически мыслить, решать сложные проблемы на основе анализа обстоятельств и соответствующей информации, взвешивать альтернативные мнения, принимать продуманные решения, участвовать в дискуссиях, общаться. Для этого на занятиях организуются групповая работа, работа с документами и различными источниками информации.

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Представлено в приложении 1.

7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

Представлены в приложении 2.

8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Основная литература:

1. Игнатенков, В. И. Общая химическая технология: теория, примеры, задачи : учебное пособие для вузов / В. И. Игнатенков. — 2-е изд. — Москва :

Издательство

Юрайт, 2024. — 195 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-09222-6. —

Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL:

<https://urait.ru/bcode/536887>

2. Смирнов А. Н. Гетерогенные химические процессы : учебное пособие / А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, В. И. Сысоев ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/20953>. - Текст : электронный.

3. Смирнов А. Н. Химические реакторы. Гомогенный изотермический процесс [Элек-тронный ресурс] : учебное пособие / А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, В. И. Сысоев ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). -

Режим дос-тупа: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/20954>

Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

б) Дополнительная литература:

1. Бочкарев, В. В. Оптимизация химико-технологических процессов : учебное пособие для вузов / В. В. Бочкарев. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 263 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-00378-9. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/490258>

2. Загкейм, А. Ю. Общая химическая технология: введение в моделирование химико-технологических процессов : учебное пособие / А. Ю. Загкейм. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : Логос, 2020. - 304 с. - (Новая университетская библиотека). - ISBN 978-5-98704-497-1. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.ru/read?id=367469> . - Режим доступа: по подписке.

3. Смирнов, А. Н. Теоретические основы химико-технологических процессов : учебное пособие / А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, В. И. Сысоев ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2018. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/2066> - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

4. Смирнов, А. Н. Производство химических продуктов : учебное пособие. Ч. 1 / А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, В. И. Сысоев; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2018. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/2227> - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

5. Крылова С. А. Введение в анализ и синтез химико-технологических систем : учебное пособие / С. А. Крылова ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/1379> . - Текст : электронный.

6. Хайбуллин, А. А. Кинетика и катализ в химической технологии : учебное пособие / А. А. Хайбуллин. — Уфа : УГНТУ, 2020. — 187 с. — ISBN 978-5-7831-1998-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/245258> — Режим доступа: для авториз. пользователей.

в) Методические указания:

1. Смирнов, А. Н. Химические процессы в реакторах : учебное пособие / А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, В. И. Сысоев ; МГТУ. - [2-е изд., подгот. по печ. изд. 2016 г.]. - Магнитогорск : МГТУ, 2017. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/3584> . - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

2. Крылова С. А. Производство метанола / С. А. Крылова, Д. И. Алексеев ; Крылова С. А., Алексеев Д. И. - Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 2023. - 75 с. - Книга из коллекции МГТУ им. Г.И. Носова - Химия. - URL: <https://e.lanbook.com/book/432746> . - URL: <https://e.lanbook.com/img/cover/book/432746.jpg> ..

г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Программное обеспечение

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
7Zip	свободно распространяемое	бессрочно
FAR Manager	свободно распространяемое	бессрочно
Браузер Yandex	свободно распространяемое	бессрочно

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Название курса	Ссылка
Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования	URL: https://elibrary.ru/project_risc.asp
Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И.	https://host.megaprolib.net/MP0109/Web
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности»	URL: http://www1.fips.ru/

9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа
Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации.

Учебная аудитория для проведения практических занятий, занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации Доска, учебные столы, стулья

Учебные аудитории для самостоятельной работы обучающихся Персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета

Помещения для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования Стеллажи для хранения оборудования

Методическая литература для учебных занятий

Химическая посуда

Инструменты для ремонта и профилактического обслуживания учебного оборудования

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Вопросы для самостоятельного контроля знаний

Математическое моделирование химических процессов и реакторов

В чем заключается метод моделирования?

Сформулируйте основные требования, предъявляемые к математической модели химического реактора.

В чем заключается иерархический принцип моделирования химических процессов и реакторов?

Какие признаки могут быть положены в основу классификации химических реакторов?

Каковы различия в условиях перемешивания в проточных реакторах смешения и вытеснения?

Какой режим работы химического реактора называется стационарным? Возможен ли стационарный режим в периодическом реакторе? В полунепрерывном реакторе?

Назовите последовательность этапов при составлении математической модели процесса в реакционной зоне.

Каким условиям должен удовлетворять элементарный объем, для которого составляются балансовые уравнения?

Каким должен быть элементарный промежуток времени при составлении балансовых уравнений для реакторов, работающих в стационарном режиме? В нестационарном режиме?

Напишите уравнение материального баланса реактора в общем виде.

Почему именно балансовые уравнения (уравнения материального и энергетического балансов) составляют основу математической модели химического реактора?

Почему при стационарном режиме работы химического реактора в нем не происходит накопления вещества и теплоты?

Составьте математические модели для реакторов

РИС-п,

РИС-н,

РИВ

Изотермический процесс в химическом реакторе

Каковы основные типы химических реакторов, предъявляемые к ним требования, приведите примеры их использования в технологии важнейших химических продуктов.

В чем заключается подобие и различие процесса в реакторах ИС-п и ИВ ?

Что такое условное время реакции и чем оно отличается от времени пребывания в реакторе?

Как меняются концентрации исходного компонента и продукта по длине реактора ИВ? Каковы их предельные значения?

Как изменится степень превращения в реакторе при протекании реакции первого порядка при увеличении начальной концентрации в 1,5 раза? Ответ поясните.

Какое предельное превращение можно получить в реакторе ИС-п при протекании обратимой реакции? Подтвердите это с помощью математической модели и изобразите графически.

В реакторе ИС-п протекает обратимая реакция. Как изменится скорость превращения в начале процесса в результате увеличения температуры? Изменится ли предельное превращение, как и почему?

Получите мат. модель процесса в реакторе ИВ при протекании сложной реакции: а) с параллельной схемой превращения; б) последовательной схемой превращения. Покажите график изменения концентраций компонентов по длине реактора и объяснит, его вид (почему концентрации увеличиваются, уменьшаются, не меняются).

В реакторе ИВ протекает последовательная реакция. Какие рекомендации можно сделать, чтобы добиться: а) максимального выхода промежуточного продукта; б) максимальной селективности по промежуточному продукту; в) максимального выхода конечного продукта?

Как меняется концентрация вещества по объему проточного реактора ИС ?

Почему производительность реактора в режиме ИВ больше, чем в режиме ИС при протекании простых реакций?

Может ли режим реактора оказывать влияние на селективность процесса при протекании сложной реакции? Ответ обоснуйте.

Назовите причины отклонения режимов в промышленных реакторах от ИС и ИВ?

5. Проанализируйте основные недостатки и достоинства реакторов периодического действия. В каких производствах чаще встречаются такие реакторы?

Гетерогенные процессы

Какие процессы относятся к гетерогенным? Перечислите стадии гетерогенного процесса. Назовите области протекания гетерогенного процесса.

Как подразделяются гетерогенные процессы по виду участвующих фаз?

В чем заключается многостадийность гетерогенного процесса? Чем отличаются условия гетерогенного процесса и условия протекающей в нем реакции?

Что такое наблюдаемая скорость гетерогенного процесса, от чего она зависит

Что такое лимитирующая стадия в гетерогенном процессе? Как лимитирующая стадия определяет режим процесса?

Чем отличается модель «сжимающаяся сфера» от модели «сжимающееся ядро»? Приведите примеры процессов.

Нарисуйте схему и объясните структуру процесса **«газ-твердое (полностью реагирующее)»**. Какие этапы процесса можно выделить? Напишите исходное уравнение мат. модели этого процесса.

Напишите уравнения для наблюдаемой скорости превращения (для реакции первого порядка) и времени полного превращения твердой частицы.

Нарисуйте графики и объясните, как меняется во времени размер частицы, степень превращения твердого реагента, скорость превращения частицы.

Как зависит наблюдаемая константа скорости превращения в процессе «сжимающаяся сфера» от температуры и скорости потока? Как эти зависимости связаны с режимом процесса?

Как можно интенсифицировать процесс «газ-твердое (полностью реагирующее)»?

Нарисуйте схему и объясните структуру процесса **«газ-твердое (неполностью реагирующее)»**. Какие этапы процесса можно выделить? Напишите исходное уравнение мат. модели этого процесса.

Напишите уравнения для наблюдаемой скорости превращения и времени полного превращения твердой частицы для разных режимов процесса.

Нарисуйте графики и объясните, как меняется во времени размер частицы, степень превращения твердого реагента, скорость превращения частицы для процесса «сжимающееся ядро» в разных режимах.

Как можно интенсифицировать процесс «газ-твердое (неполностью реагирующее)» в разных режимах его протекания?

Укажите способы определения области протекания процесса в системе «газ – твердое тело».

Приведите примеры технологических процессов «газ-жидкость» и способы организации взаимодействия газа с жидкостью.

Нарисуйте схему и объясните структуру процесса «газ-жидкость». Какие этапы процесса можно выделить? Напишите исходное уравнение мат. модели этого процесса.

В чем различие структур процессов «газ-твердое» и «газ-жидкость»?

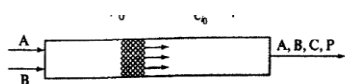
Напишите выражение для наблюдаемой скорости превращения. От каких условий и как зависит наблюдаемая скорость превращения в разных режимах?

С чем связано возможное уменьшение скорости превращения при повышении температуры?

Как можно интенсифицировать процесс «газ-жидкость»?

Примеры тестовых заданий

1. Что изображено на рисунке?

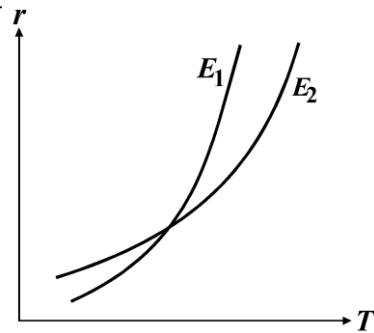


- a) реактор идеального смешения;
- b) реактор идеального вытеснения;
- c) адиабатический реактор.

2. В каких случаях оправдано проведение реакции при избытке одного из компонентов?

- a) если реакция обратимая, один из компонентов (более дешёвый или более доступный) берется в избытке для повышения степени превращения другого (более ценного) компонента;
- b) избыток одного из компонентов не оправдан, так как для наилучшего протекания реакции необходимо брать компоненты в стехиометрических количествах;
- c) избыток одного из компонентов уместен в случае, когда другой компонент ядовит или когда продукты реакции повышено токсичны;
- d) когда один из компонентов токсичен или когда продукты реакции ядовиты, реагенты следует брать строго в стехиометрических количествах.

3. На графике приведены зависимости скорости простых необратимых реакций от температуры с разными энергиями активации E_1 и E_2 . Какое соотношение между E_1 и E_2 ?



- a) $E_1 > E_2$;
- b) $E_1 < E_2$;
- c) $E_1 \approx E_2$.

Примеры расчетных заданий по темам:

Пример 1. Рассчитать среднее время пребывания реагентов в проточном реакторе идеального смешения, необходимое для достижения степени превращения исходного реагента $x_{A,f} = 0,8$.

В реакторе протекает реакция второго порядка $2A \rightarrow R + S$, скорость которой описывается при постоянной температуре кинетическим уравнением $\omega_{r,A} = 2,5 c_A^2$. Начальная концентрация реагента A на входе в реактор $c_{A,0} = 4 \text{ кмоль/м}^3$.

Решение. Для определения $\bar{\tau}$ можно использовать уравнение (12); концентрацию реагента в реакторе, необходимую для расчета скорости протекающей в нем реакции, выразим через степень превращения

$$\bar{\tau} = \frac{c_{A,0} \cdot x_{A,f}}{\omega_{r,A}} = \frac{c_{A,0} \cdot x_{A,f}}{k c_{A,f}^2} = \frac{c_{A,0} \cdot x_{A,f}}{k c_{A,0}^2 (1 - x_{A,f})^2} = \frac{0,8}{2,5 \cdot 4 \cdot (1 - 0,8)^2} = 24.$$

Таким образом, для достижения степени превращения $x_A = 0,8$ необходимо, чтобы соотношение между объемом реактора и объемным расходом через него составляло $\bar{\tau} = V/v = 24 \text{ ч}$.

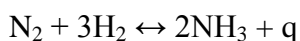
Пример 2.

Определить производительность 1 м³ катализатора синтеза аммиака при следующих условиях: концентрация аммиака в конечном газе (на выходе из реактора) $S_{\text{кон}} = 26,5\%$

(об), в начальном газе (на входе в реактор) $C_{\text{нач}} = 2.7\%$ (об), объемная скорость газа $V_{\text{об}} = 45000 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$ катализатора.

Решение.

Синтез аммиака основан на экзотермической обратимой реакции, идущей с уменьшением объема



Реакция синтеза аммиака требует большой энергии активации. Процесс ведут в промышленности в присутствии катализатора при высоком давлении, повышающем равновесную степень превращения, и при высокой температуре, обеспечивающей достаточно большую скорость процесса, но в известной мере смещающей равновесие в сторону исходных продуктов. Катализатором синтеза аммиака служит железо с активаторами K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO . Однако в оптимальных условиях проведения процесса фактический выход аммиака невелик ($X = 18\text{-}22\%$) поэтому процесс ведут по циклической схеме.

В колонну синтеза подается циркуляционный газ, содержащий несконденсировавшийся в холодильнике аммиака и свежая азото-водородная смесь, в количестве, компенсирующем полученный продукт и потери. Выход аммиака x отвечает содержанию его в азото-водородной смеси, выходящей из реактора. В нашем случае

$$x = \frac{C_{\text{кон}} - C_{\text{нач}}}{100} + C_{\text{кон}} = \frac{26.5 - 2.7}{102.7} = 23.2\%(\text{об.}) \text{ или } 0.232 \text{ мол. доли NH}_3.$$

Производительность катализатора в колонне синтеза аммиака при данном давлении и составе азото-водородной смеси определяют по формуле

$$P = 0.771 \cdot x \cdot V_{\text{об}} \cdot \beta$$

Здесь 0.771 – масса 1 м³ NH₃; β – коэффициент, характеризующий уменьшение объема газа в результате реакции синтеза аммиака, определяемый по формуле:

$$\beta = 100 + \frac{C_{\text{нач}}}{100} + C_{\text{кон}} = 100 + \frac{2.7}{100} + 26.5 = 0.81$$

$$P = 0.771 \cdot 0.232 \cdot 45000 \cdot 0.81 = 6500 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3 \text{ катализатора}).$$

Пример 3

В реакторе протекает реакция второго порядка $2A \rightarrow R + S$, скорость которой описывается при постоянной температуре кинетическим уравнением $\omega_{r,A} = 2,5 c_A^2$.

Начальная концентрация реагента A на входе в реактор $c_{A,0} = 4 \text{ кмоль}/\text{м}^3$, степень превращения исходного реагента ($x_{A,f} = 0,8$), проводят в каскаде реакторов идеального смешения. Все секции каскада имеют одинаковый объем, подобранный таким образом, что среднее время пребывания в каждой из них $\bar{\tau}_i$ равно 1/10 от среднего времени пребывания в единичном реакторе идеального смешения, рассчитанного в примере 1 ($\bar{\tau}_i = 0,2 \text{ ч}$).

Определить, сколько таких секций потребуется для достижения заданной степени превращения.

Решение. Для решения используем графический метод. Для этого построим графики функции $w_{rA} = 2,5 c_A^2$ (парабола) и

$$y = \frac{c_{A,i-0}}{\bar{\tau}_i} - \frac{1}{\bar{\tau}_i} c_A = \frac{4}{0,2} - \frac{1}{0,2} c_A$$

(прямая с тангенсом угла наклона $\operatorname{tg} \alpha = -\frac{1}{\bar{\tau}} = -0,5$).

Точка пересечения этих линий M_1 (рис.) позволяет определить концентрацию на выходе из первой секции каскада. Проводя параллельные прямые

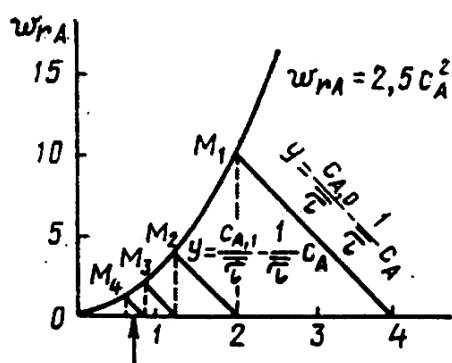


Рисунок . Графическое определение числа секций каскада реакторов идеального смешения

$$y = \frac{c_{A,i-1}}{\bar{\tau}_i} - \frac{1}{\bar{\tau}_i} c_{A,f}$$

до тех пор, пока не будет выполнено условие $c_{A,i} \leq 0,8 \text{ кмоль/м}^3$ (так как $c_{A,f} = c_{A,0}(1 - x_{A,f}) = 4 \cdot (1 - 0,2) = 0,8 \text{ кмоль/м}^3$), получаем, что для достижения указанной степени превращения необходимо 4 секции. При этом оказывается, что на выходе из четвертой секции степень превращения даже выше, чем задана по условию, но в трех секциях заданная степень превращения не достигается.

Таким образом, суммарное среднее время пребывания реагентов в каскаде реакторов идеального смешения для условий примера составляет $\tau_{\Sigma, \text{каскад}} = 4 \cdot \bar{\tau}_i = 0,8 \text{ ч}$.

Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

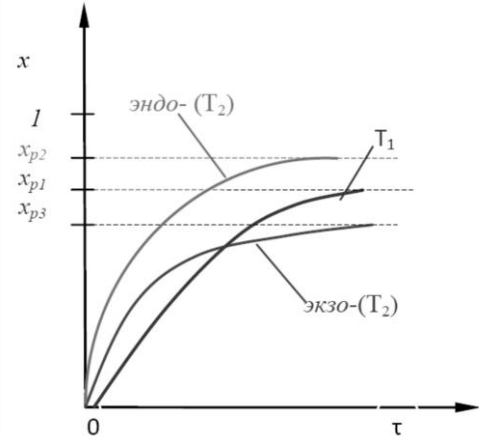
Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
<p>ОПК-4: Способен обеспечивать проведение технологического процесса, использовать технические средства для контроля параметров технологического процесса, свойств сырья и готовой продукции, осуществлять изменение параметров технологического процесса при изменении свойств сырья</p>		
<p>ОПК-4.1</p>	<p>Определяет технические средства на производстве для обеспечения технологических процессов</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обжиг ZnS проводится в наклонном трубчатом реакторе. Частицы твердого вещества движутся со скоростью 11,5 см/с. Известно, что при данных условиях за 1 мин степень превращения ZnS составляет 65 %. Определить длину реактора, обеспечивающую 95% степень превращения исходного сырья, если обжиг проводится в кинетической области. При решении можно использовать справочные таблицы с формулами. – Изобразите схему реактора ИС-н. Выведите уравнения, описывающие режим ИС-н. – Изобразите схему реактора ИВ. Выведите уравнения, описывающие режим ИВ. – Изобразите схему реактора ИС-п. Выведите уравнения, описывающие режим ИС-п. – Докажите, что модель каскада реакторов идеального смешения является промежуточной между моделями идеального вытеснения и идеального смешения. – По фазовому составу реакционной смеси реакторы классифицируются на: <ul style="list-style-type: none"> а) стационарные, нестационарные,

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства				
		<p>б) периодические, непрерывные, полунепрерывные, в) политермические, адиабатические, изотермические, автотермические, г) реактора для проведения гомогенных и гетерогенных процессов.</p> <p>– Что характеризует адиабатический режим работы аппарата: а) реакция в реакторе идет с поглощением тепла, б) процесс в реакторе идет при постоянном давлении, в) отсутствует теплообмен с окружающей средой, г) объем реакционной смеси в реакторе в ходе процесса не меняется.</p>				
ОПК-4.2	Оценивает и контролирует параметры и эффективность технологических процессов, свойства сырья и готовой продукции в области химической технологии	<p>– Почему для достижения той же степени превращения при одинаковых условиях проведения реакции в проточном реакторе идеального смешения требуется существенно большее время пребывания реакционной смеси, чем в реакторе идеального вытеснения или в периодическом реакторе идеального смешения?</p> <p>– Составьте кинетические уравнения сложных реакций по каждому из веществ, участвующих в реакции, протекающей по схеме</p> $A + B \xrightarrow{k_1} P + C$ $A + P \xrightarrow{k_2} C + D$ <p>– Тепловым расчетом определить температуру, до которой необходимо нагреть аммиачно-воздушную смесь, чтобы процесс окисления аммиака протекал автотермично. Данные для расчета:</p> <table border="1" data-bbox="936 1310 2159 1458"> <tbody> <tr> <td data-bbox="936 1310 1977 1390">Степень превращения NH_3 в NO ,%</td> <td data-bbox="1977 1310 2159 1390">96,0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="936 1390 1977 1458">Степень абсорбции, %</td> <td data-bbox="1977 1390 2159 1458">96,5</td> </tr> </tbody> </table>	Степень превращения NH_3 в NO ,%	96,0	Степень абсорбции, %	96,5
Степень превращения NH_3 в NO ,%	96,0					
Степень абсорбции, %	96,5					

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства	
		Содержание аммиака в сухой аммиачно – воздушной смеси, % (масс.).	10,0
		Температура конверсии, °С:	800
		Теплопотери в окружающую среду, % от прихода теплоты	5
		<ul style="list-style-type: none"> – Для достижения максимальной интенсивности процесса с обратимой экзотермической реакцией первого порядка оптимальным температурным режимом является <ul style="list-style-type: none"> а) процесс проводят при максимально допустимой температуре. б) процесс начинается при высокой температуре, затем в ходе процесса (по мере увеличения степени превращения) ее снижают по линии оптимальных температур. в) процесс проводят при минимально допустимой температуре г) температура не влияет на интенсивность процесса – Показатели процесса в реакторе это: <ul style="list-style-type: none"> а) степень превращения x, селективность S, выход продукта E, а так же профили концентрации, степени превращения и температуры в реакторе, их изменение во времени б) схема превращения и тип реакций (вид кинетических уравнений), энергия активации, тепловой эффект; для неизотермических процессов – параметры теплоотвода (коэффициенты теплопередачи, величина поверхности теплообмена, теплофизические свойства потока.). 	

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>в) состав исходной реакционной смеси (исходные концентрации реагентов C_{i0}), объем поступающего потока (нагрузка на реактор V_0), температуры входного потока T_0, хладагента T_x (для процессов с теплоотводом) или в реакторе (для изотермического процесса – T).</p> <p>г) исследование влияния условий процесса и характеристик (свойств) его составляющих на показатели работы реактора, а также выявление особенностей процесса и режима.</p> <ul style="list-style-type: none"> – В какой области осуществляется гетерогенный процесс, если повышение температуры приводит к значительному возрастанию скорости процесса? <ul style="list-style-type: none"> а) в переходной; б) во внутридиффузионной в) во внешнедиффузионной; г) в кинетической
ОПК-4.3	Прогнозирует и регулирует изменение параметров технологических процессов в зависимости от свойств сырья	<ul style="list-style-type: none"> – В реакторе ИВ протекает последовательная реакция. Какие рекомендации можно сделать, чтобы добиться: а) максимального выхода промежуточного продукта; б) максимальной селективности по промежуточному продукту; в) максимального выхода конечного продукта? – Проведите анализ модели изотермических процессов ИС-п и ИВ-н с протеканием простых необратимых реакций $A \rightarrow B$ разного порядка (характеристическое уравнение для τ, зависимости $C(\tau)$ и $x(\tau)$). Влияние концентрации исходного вещества, температуры на изменение функции $x(\tau)$. – Проведите анализ изотермических процессов ИС-п и ИВ-н с протеканием простой

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>обратимой реакции первого порядка (зависимость $x(\tau)$, влияние концентрации исходного вещества на изменение функции $x(\tau)$. Влияние температуры на скорость и интенсивность процесса в случае экзо- и эндотермических реакций).</p> <ul style="list-style-type: none"> – Проведите анализ изотермических процессов ИС-п и ИВ-н с протеканием сложной реакции с параллельной схемой превращения (зависимости $CA(\tau)$, $x_A(\tau)$, $CR(\tau)$, $CS(\tau)$). Влияние температуры на интенсивность и селективность процесса). – Проведите анализ изотермических процессов в реакторе ИС-п и ИВ-н с протеканием сложной реакции с последовательной схемой превращения (зависимости $CA(\tau)$, $x_A(\tau)$, $CR(\tau)$, $CS(\tau)$. Максимальный выход продукта R (CR_{max}) . Влияние температуры на интенсивность, CR_{max} и селективность процесса). – Процесс осуществляется с протеканием простой обратимой реакции первого порядка $A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} R$ <p>Зависимость степени превращения $x(\tau)$ при температурах T_1 и $T_2 > T_1$ для эндотермической и экзотермической реакций в реакторе ИВ (или ИС-п) представлена на рис.</p>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		 <p data-bbox="1025 986 2168 1056">штриховыми линиями показаны равновесные степени превращения x_p для тех же условий</p> <p data-bbox="1025 1061 2168 1129">Какой температурный режим будет оптимальным для обеспечения максимальной интенсивности процесса с экзотермической и эндотермической реакцией?</p>

б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:

Промежуточная аттестация по дисциплине «Химические реакторы» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме экзамена в устной форме по экзаменационным билетам, каждый из которых включает 2 теоретических вопроса и одно практическое задание или в форме теста (на усмотрение преподавателя).

Показатели и критерии оценивания экзамена:

– на оценку **«отлично»** (5 баллов) – обучающийся демонстрирует высокий уровень сформированности компетенций, высокий уровень знаний не только на уровне воспроизведения и объяснения информации, но и интеллектуальные навыки решения проблем и задач:

- дается комплексная оценка предложенной ситуации;
- демонстрируются глубокие знания теоретического материала и умение их применять;
- последовательное, правильное выполнение всех практических заданий;
- умение обоснованно излагать свои мысли, делать необходимые выводы.

– на оценку **«хорошо»** (4 балла) – обучающийся демонстрирует средний уровень сформированности компетенций:

- дается комплексная оценка предложенной ситуации;
- демонстрируются достаточные знания теоретического материала и умение их применять; но допускаются незначительные ошибки, неточности
- выполнение всех практических заданий; возможны единичные ошибки, исправляемые самим студентом после замечания преподавателя;
- затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации.

– на оценку **«удовлетворительно»** (3 балла) – обучающийся демонстрирует пороговый уровень сформированности компетенций:

- затруднения с комплексной оценкой предложенной ситуации;
- неполное теоретическое обоснование, требующее наводящих вопросов преподавателя;
- выполнение заданий при подсказке преподавателя;
- затруднения в формулировке выводов.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (2 балла) – обучающийся демонстрирует знания не более 20% теоретического материала, допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (1 балл) – обучающийся не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

Показатели и критерии оценивания экзамена в виде теста:

Вопросы тестов охватывают весь объем изучаемой дисциплины в соответствии с РПД. Преподаватель может попросить студента обосновать выбранный ответ теста.

– **на оценку «отлично» (5 баллов)** – обучающийся демонстрирует высокий уровень сформированности компетенций, всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, свободно выполняет практические задания, свободно оперирует знаниями, умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности, что соответствует результату тестирования **75% и более;**

– **на оценку «хорошо» (4 балла)** – обучающийся демонстрирует средний уровень сформированности компетенций: основные знания, умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации, что соответствует результату тестирования **60 -74 %;**

– **на оценку «удовлетворительно» (3 балла)** – обучающийся демонстрирует пороговый уровень сформированности компетенций: в ходе контрольных мероприятий допускаются ошибки, проявляется отсутствие отдельных знаний, умений, навыков, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации, что соответствует результату тестирования **50 - 59 %;**

– **на оценку «неудовлетворительно» (2 балла)** – обучающийся не демонстрирует знания теоретического материала, допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач, что соответствует результату тестирования **менее 50 %.**