



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

09.02.2023 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 материалобработки
Кафедра	Металлургии и химических технологий
Курс	4
Семестр	7


Магнитогорск  
2023 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  
08.02.2023, протокол № 5

Зав. кафедрой  А.С. Харченко

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИММиМ  
09.02.2023 г. протокол № 5

Председатель  А.С. Савинов

Рабочая программа составлена:  
доцент кафедры МиХТ, канд. хим. наук

 С.А. Крылова

Рецензент:

доцент кафедры Химии, канд. техн. наук  Л.Г. Коляда

## Лист актуализации рабочей программы

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2024 - 2025 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 2025 - 2026 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 2026 - 2027 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 2027 - 2028 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:

Производственная-преддипломная практика

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 2 зачетных единиц 72 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 37 акад. часов;
- аудиторная – 36 акад. часов;
- внеаудиторная – 1 акад. часов;
- самостоятельная работа – 35 акад. часов;
- в форме практической подготовки – 0 акад. час;

Форма аттестации - зачет

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. 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	7	2			0,5	Работа с конспектом	Конспект	ОПК-4.2, ОПК-4.3, ОПК-4.1
Итого по разделу		2			0,5			
2. Математическое моделирование хими-ческих процессов и реакторов								
2.1 Модель реактора идеального смешения периодического действия.	7	1		1	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
2.2 Модель реактора идеального смешения непрерывного действия		1		1	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3

2.3 Модель реактора идеального вытеснения непрерывного действия		1		1	2	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		3		3	10			
3. Изотермический гомогенный процесс в								
3.1 Анализ процесса в химическом реакторе.	7	4		4	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. - Подготовка к практическому занятию, семинару, тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест.	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	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		6		6	8			
4. Гетерогенный процесс в химическом реакторе								
4.1 Режим и лимитирующие стадии процесса. Общие принципы управления скоростью гетерогенного процесса.	7	1		2	3,5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиуму) тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
4.2 Система «газ (жидкость) – твердое (не полностью реагирующее)». Система «газ (жидкость) - твердое (полностью реагирующее)».		2		4	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиуму), тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		3		6	7,5			
5. Неизотермический процесс в химическом реакторе.								

5.1 Режимы идеального смешения периодического и идеального вытеснения с теплообменом	7	2		1	4	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиуму), тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест,	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
5.2 Температурный режим в проточном реакторе идеального смешения Сопоставление адиабатического процесса в проточных режимах идеального смешения и вытеснения		2		2	5	Самостоятельное изучение учебной и научной литературы. Подготовка к практическому занятию, семинару (коллоквиуму), тестированию	Выступление на семинаре, выполнение расчетных заданий Тест	ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3
Итого по разделу		4		3	9			
Итого за семестр		18		18	35		зачёт	
Итого по дисциплине		18		18	35		зачет	

## **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.

Реализация такого подхода осуществляется следующим образом:

1. Распределение тем рефератов (тем для выступления) с учетом пожеланий студентов, тематики их научных интересов и т.п.

2. Подготовка студентами формы отчетности самостоятельной работы (реферат-презентация, выступление на семинаре).

3. Обсуждение подготовленного отчета в режиме дискуссии с элементами коллективного решения творческих задач.

## **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 (модуля)**

### **а) Основная литература:**

1. Игнатенков, В. И. Общая химическая технология: теория, примеры, задачи : учебное пособие для академического бакалавриата / В. И. Игнатенков. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 195 с. — (Бакалавр.Академический курс). — ISBN 978-5-534-09222-6. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/viewer/obschaya-himicheskaya-tehnologiya-teoriya-primery-zadachi-450986#page/1>

2. Смирнов, А. Н. Химические реакторы. Гомогенный изотермический процесс : учебное пособие / А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, В. И. Сысоев ; МГТУ. - Магнито-горск : МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=70.pdf&show=dcatalogues/1/113034/5/70.pdf&view=true> . - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

3. 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). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=67.pdf&show=dcatalogues/1/113004/6/67.pdf&view=true> . - 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> <https://urait.ru/viewer/optimizaciya-himiko-tehnologicheskikh-processov-490258#page/1>

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.com/catalog/product/1212487> . – 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://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3515.pdf&show=dcatalogues/1/1514/321/3515.pdf&view=true> - 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://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3663.pdf&show=dcatalogues/1/1526/324/3663.pdf&view=true> . - 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). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=25.pdf&show=dcatalogues/1/1131464/25.pdf&view=true> . - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

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> (дата обращения: 21.04.2023). — 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://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=69.pdf&show=dcatalogues/1/1139091/69.pdf&view=true> . - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

2. Теоретические основы химической технологии: учеб. пособие /А.Н. Смирнов, С.А. Крылова, В.И. Сысоев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 61 с. - Текст :непосредственный.

#### г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

##### Программное обеспечение

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
7Zip	свободно распространяемое	бессрочно
MS Office 2007 Professional	№ 135 от 17.09.2007	бессрочно
FAR Manager	свободно распространяемое	бессрочно
Браузер	свободно распространяемое	бессрочно

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

Название курса	Ссылка
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности»	URL: <a href="http://www1.fips.ru/">http://www1.fips.ru/</a>
Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И. Носова	<a href="https://magtu.informsystema.ru/Marc.html?locale=ru">https://magtu.informsystema.ru/Marc.html?locale=ru</a>
Поисковая система Академия Google (Google Scholar)	URL: <a href="https://scholar.google.ru/">https://scholar.google.ru/</a>
Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования	URL: <a href="https://elibrary.ru/project_risc.asp">https://elibrary.ru/project_risc.asp</a>

#### 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»?

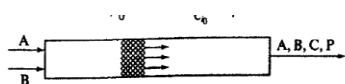
Напишите выражение для наблюдаемой скорости превращения. От каких условий и как зависит наблюдаемая скорость превращения в разных режимах?

С чем связано возможное уменьшение скорости превращения при повышении температуры?

Как можно интенсифицировать процесс «газ-жидкость»?

### Примеры тестовых заданий

1. Что изображено на рисунке?

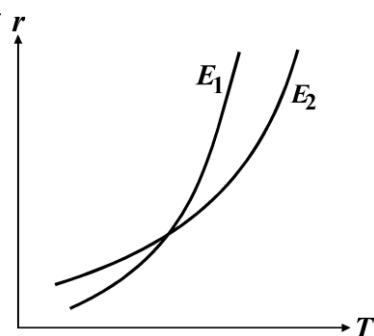


- a) реактор идеального смешения;
- b) реактор идеального вытеснения;
- c) адиабатический реактор.

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  $\omega_{rA} = 2,5 c_A^2$ . 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

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

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.**

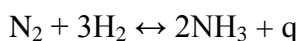
Определить производительность 1 м<sup>3</sup> катализатора синтеза аммиака при следующих условиях: концентрация аммиака в конечном газе (на выходе из реактора)  $S_{\text{кон}} = 26,5\%$



(об), в начальном газе (на входе в реактор)  $C_{нач} = 2.7\%$  (об), объемная скорость газа  $V_{об} = 45000 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$  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  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ . 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

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

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

$$П = 0.771 \cdot x \cdot V_{об} \cdot \beta$$

Здесь 0.771 – масса 1 м<sup>3</sup> NH<sub>3</sub>;  $\beta$  – коэффициент, характеризующий уменьшение объема газа в результате реакции синтеза аммиака, определяемый по формуле:

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

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

### 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

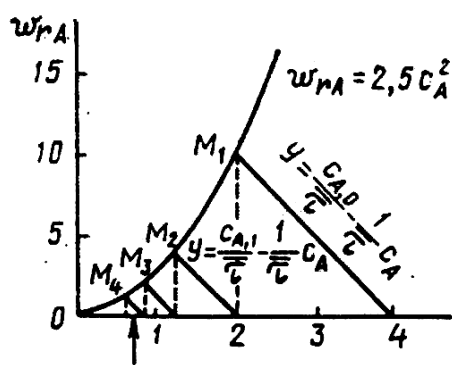


Рисунок . Графическое определение числа секций каскада реакторов идеального смешения

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

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:

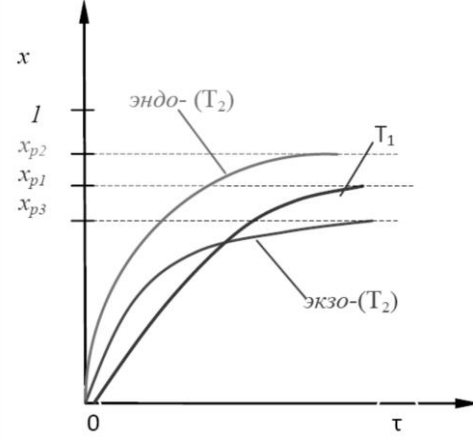
Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
<p><b>ОПК-4: Способен обеспечивать проведение технологического процесса, использовать технические средства для контроля параметров технологического процесса, свойств сырья и готовой продукции, осуществлять изменение параметров технологического процесса при изменении свойств сырья</b></p>		
<p>ОПК-4.1</p>	<p>Определяет технические средства на производстве для обеспечения технологических процессов</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 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.</li> <li>– Изобразите схему реактора ИС-н. Выведите уравнения, описывающие режим ИС-н.</li> <li>– Изобразите схему реактора ИВ. Выведите уравнения, описывающие режим ИВ.</li> <li>– Изобразите схему реактора ИС-п. Выведите уравнения, описывающие режим ИС-п.</li> <li>– Докажите, что модель каскада реакторов идеального смешения является промежуточной между моделями идеального вытеснения и идеального смешения.</li> <li>– По фазовому составу реакционной смеси реакторы классифицируются на:             <ul style="list-style-type: none"> <li>а) стационарные, нестационарные,</li> <li>б) периодические, непрерывные, полунепрерывные,</li> </ul> </li> </ul>

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства				
		<p>в) политермические, адиабатические, изотермические, автотермические, г) реактора для проведения гомогенных и гетерогенных процессов.</p> <p>– Что характеризует адиабатический режим работы аппарата:</p> <p>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 2152 1455"> <tbody> <tr> <td data-bbox="936 1310 1977 1390">Степень превращения <math>NH_3</math> в <math>NO</math> ,%</td> <td data-bbox="1977 1310 2152 1390">96,0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="936 1390 1977 1455">Степень абсорбции, %</td> <td data-bbox="1977 1390 2152 1455">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"> <li>– Для достижения максимальной интенсивности процесса с обратимой экзотермической реакцией первого порядка оптимальным температурным режимом является               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) процесс проводят при максимально допустимой температуре.</li> <li>б) процесс начинается при высокой температуре, затем в ходе процесса (по мере увеличения степени превращения) ее снижают по линии оптимальных температур.</li> <li>в) процесс проводят при минимально допустимой температуре</li> <li>г) температура не влияет на интенсивность процесса</li> </ul> </li>   <li>– Показатели процесса в реакторе это:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) степень превращения <math>x</math>, селективность <math>S</math>, выход продукта <math>E</math>, а так же профили концентрации, степени превращения и температуры в реакторе, их изменение во времени</li> <li>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.).</li> </ul> </li> </ul>	

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		<p>в) состав исходной реакционной смеси (исходные концентрации реагентов <math>C_{i0}</math>), объем поступающего потока (нагрузка на реактор <math>V_0</math>), температуры входного потока <math>T_0</math>, хладагента <math>T_X</math> (для процессов с теплоотводом) или в реакторе (для изотермического процесса – <math>T</math>).</p> <p>г) исследование влияния условий процесса и характеристик (свойств) его составляющих на показатели работы реактора, а также выявление особенностей процесса и режима.</p> <p>– В какой области осуществляется гетерогенный процесс, если повышение температуры приводит к значительному возрастанию скорости процесса?</p> <p>а) в переходной;  б) во внутридиффузионной  в) во внешнедиффузионной;  г) в кинетической</p>
ОПК-4.3	Прогнозирует и регулирует изменение параметров технологических процессов в зависимости от свойств сырья	<p>– 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?</p> <p>– Проведите анализ модели изотермических процессов ИС-п и ИВ-н с протеканием <b>простых необратимых реакций <math>A \rightarrow B</math> разного порядка</b> (характеристическое уравнение для <math>\tau</math>, зависимости <math>C(\tau)</math> и <math>x(\tau)</math>). Влияние концентрации исходного вещества, температуры на изменение функции <math>x(\tau)</math>.</p>

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

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции	Оценочные средства
		 <p data-bbox="1030 989 2172 1053">штриховыми линиями показаны равновесные степени превращения <math>x_p</math> для тех же условий</p> <p data-bbox="1030 1061 2172 1133">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 зачета.

Зачет по данной дисциплине проводится в устной форме по вопросам из списка, доведенного до сведения студентов, вопрос может содержать небольшое практическое задание.

Показатели и критерии оценивания зачета:

– оценку **«зачтено»** студент получает, если может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, интеллектуальные навыки решения простых задач, может дать оценку предложенной ситуации.

– оценку **«незачтено»** студент получает, если не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач, дать оценку предложенной ситуации.