

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное учреждение
высшего профессионального образования
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"
Химический институт им. А.М. Бутлерова



Программа дисциплины

Особенности эксплуатации катализаторов Б1.В.ДВ.5

Направление подготовки: 04.04.01 - Химия
Профиль подготовки: Нефтехимия и катализ
Квалификация выпускника: магистр
Форма обучения: очное
Язык обучения: русский

Автор(ы):

Ламберов А.А.

Рецензент(ы):

Соломонов Б.Н.

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий(ая) кафедрой: Соломонов Б. Н.

Протокол заседания кафедры No ____ от " ____ " _____ 201__ г

Учебно-методическая комиссия Химического института им. А.М. Бутлерова:

Протокол заседания УМК No ____ от " ____ " _____ 201__ г

Регистрационный No 748315

Казань
2015

Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) заместитель директора по связям с промышленностью и коммерциализации Ламберов А.А. директорат химического института им. А.М. Бутлерова Химический институт им. А.М. Бутлерова , Alexander.Lamberov@kpfu.ru

1. Цели освоения дисциплины

- определению оптимальных условий осуществления каталитических процессов и реализации этих условий в реакторах различного типа;
- получение знаний в области аппаратурного оформления промышленных каталитических процессов;
- знания о химических и физических процессах, протекающих в каталитических реакторах;
- выявление особенностей эксплуатации катализаторов в промышленных процессах;
- установление основных способов предсказания срока службы каталитических систем, и способов регенерации катализаторов

2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б1.В.ДВ.5 Дисциплины (модули)" основной образовательной программы 04.04.01 Химия и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 2 курсе, 3 семестр.

относится к профессиональному циклу Б1, его вариативной Б1.В.ДВ.5 части и опирается на основные разделы общенаучных дисциплин: высшая математика, неорганическая химия, органическая химия, физическая химия, химическая технология, строение вещества, каталитические методы в органическом синтезе; естественнонаучных и специальных дисциплин: химическая термодинамика, кинетика химических реакций, современные химические производства, перспективные промышленные каталитические процессы, техника каталитических экспериментов, физико-химические методы исследования в катализе

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-1 (общекультурные компетенции)	способностью владеть культурой мышления, умение аргументировано и ясно строить устную и письменную речь
ОК-2 (общекультурные компетенции)	способностью уважительно и бережно относиться к историческому наследию и культурным традициям, толерантность в восприятии социальных и культурных различий
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью демонстрации общенаучных базовых знаний естественных наук, математики и информатики, понимание основных фактов, концепций, принципов теорий, связанных с прикладной математикой и информатикой
ПК-10 (профессиональные компетенции)	способностью применять в профессиональной деятельности современные языки программирования и языки баз данных, операционные системы, электронные библиотеки и пакеты программ, сетевые технологии
ПК-3 (профессиональные компетенции)	способностью понимать и применять в исследовательской и прикладной деятельности современный математический аппарат

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-5 (профессиональные компетенции)	способностью критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости вид и характер своей профессиональной деятельности
ПК-6 (профессиональные компетенции)	способностью осуществлять целенаправленный поиск информации о новейших научных и технологических достижениях в сети Интернет и из других источников
ПК-7 (профессиональные компетенции)	способностью собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования выводов по соответствующим научным, профессиональным, социальным и этическим проблемам

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

методы проведения эксперимента в лабораторных условиях, критерии эффективности каталитического процесса, особенности эксплуатации различных катализаторов, современные каталитические производства и тенденции их развития

2. должен уметь:

при изучении нового химического каталитического процесса получить в лабораторных условиях экспериментальные данные, пригодные для экстраполяции к промышленным условиям, в промышленных условиях подбирать и регулировать условия наиболее благоприятные для применяемого катализатора

3. должен владеть:

представлением о химических и физических процессах, протекающих как на поверхности и в отдельной грануле катализатора, так и в реакторах различного типа

при изучении нового химического каталитического процесса получить в лабораторных условиях экспериментальные данные, пригодные для экстраполяции к промышленным условиям

4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных(ые) единиц(ы) 72 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет в 3 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
	Тема 1. Введение.						

Применение гетерогенных катализаторов в химической промышленности

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
2.	Тема 2. Кинетика каталитических реакций	3	3-4	0	3	1	устный опрос
3.	Тема 3. Процессы переноса в грануле и слое катализатора	3	5-6	0	3	2	контрольная работа
4.	Тема 4. Особенности эксплуатации промышленных катализаторов	3	7-8	0	3	2	устный опрос
5.	Тема 5. Каталитические реакторы и особенности эксплуатации катализаторов	3	9-10	0	3	1	контрольная работа
6.	Тема 6. Особенности эксплуатации катализаторов на примере промышленных каталитических процессов	3	11-12	0	3	2	контрольная работа
	Тема . Итоговая форма контроля	3		0	0	0	зачет
	Итого			0	18	8	

4.2 Содержание дисциплины

Тема 1. Введение. Применение гетерогенных катализаторов в химической промышленности

практическое занятие (3 часа(ов)):

Введение. Применение гетерогенных катализаторов в химической промышленности Введение Катализом называют изменение скорости или возбуждение химической реакции при воздействии веществ - катализаторов, которые участвуют в реакции, но не входят в состав конечных продуктов. Катализатор не находится в стехиометрическом отношении с продуктами и, как правило, регенерируется после каждого цикла превращений реагентов в продукты. В большинстве случаев количество катализатора много меньше количества реагентов. Различают положительный катализ, когда катализатор ускоряет реакцию, и отрицательный, когда катализатор замедляет реакцию. В большинстве случаев под термином катализ понимают положительный катализ. Явление ускорения реакции при воздействии продукта реакции или одного из промежуточных веществ называют автокатализом. Основные стадии катализа Гетерогенно-каталитическую реакцию можно разбить на следующие основные стадии: диффузия компонентов к катализатору; адсорбция; собственно каталитическая реакция (химические превращения на поверхности, обычно несколько стадий); десорбция и обратная диффузия продуктов реакции. Адсорбцией называют повышение концентрации молекул, атомов или ионов вблизи поверхности твердого тела. Адсорбируемое вещество называют адсорбатом, а твердое тело, на котором протекает адсорбция, - адсорбентом. Классификация каталитических процессов и катализаторов по механизму, подбор катализаторов Для общей ориентации в подборе катализаторов полезна классификация каталитических процессов по механизму действия катализаторов. Согласно Рогинскому, каталитические реакции можно разделить на два больших класса: окислительно-восстановительные (одноэлектронные) и кислотно-основные (ионные). К первому классу относят процессы, связанные с переходом электронов: окисление, восстановление, гидрирование, дегидрирование, разложение кислородсодержащих соединений типа H_2O_2 , N_2O , $KClO_4$. Типичными катализаторами для них являются металлы и полупроводники. Ко второму классу причисляют реакции кислотного-основного взаимодействия: каталитический крекинг, гидратация, дегидратация, гидролиз, многие реакции изомеризации, полимеризации, конденсации органических веществ. Типичными катализаторами этого класса являются твердые тела, обладающие кислотными (аморфные и синтетические алюмосиликаты, Al_2O_3 , ThO_2 , сверхкислоты: высококремнистые цеолиты, гетерополикислоты) и основными (MgO , CaO) свойствами. Также существует разделение реакций в органической химии по механизму элементарного акта на гомолитические и гетеролитические. В элементарном акте гомолитической реакции происходит разделение электронов двухэлектронной пары, образующей химическую ковалентную связь А-В. В гетеролитических реакциях образование и разрушение химических связей протекают без разделения пары электронов. В отдельный, третий, класс следует выделить катализ координационными соединениями. Координационная связь - это донорно-акцепторная связь, реализующаяся в комплексных соединениях. Число связей (n), которые центральный (металлический) атом М образует с другими атомами или группами - лигандами L - в комплексе ML_n превышает формальную валентность металла М.

Тема 2. Кинетика каталитических реакций

практическое занятие (3 часа(ов)):

Кинетика каталитических реакций Этапы кинетических исследований. Экспериментальные методы определения скоростей реакций, требования к условиям проведения экспериментов Непосредственная задача кинетического эксперимента сводится к получению данных о величинах выходов продуктов реакции (степеней превращения) как функции параметров процесса. Такими параметрами являются время контакта, исходный состав смеси, температура, давление. Указанные функциональные зависимости могут быть получены путем варьирования данных параметров; при этом целесообразно, чтобы в каждой серии опытов подвергался изменению только один параметр. Изучение кинетики конкретных химических реакций начинается, как правило, с построения экспериментально определяемых зависимостей $C_i=f(\tau)$, которые носят название кинетических кривых. Далее начинается анализ этих данных и изучение механизма протекания реакции. Критериями пригодности выбираемого метода исследования должны быть следующие: 1) точность результатов, достаточная для их обработки; 2) стабильность условий в течение всего опыта; 3) возможность воспроизведения условий предшествующих опытов; 4) легкость изменения условий опытов при переходе от одного к другому; 5) сохранение катализатора в стабильном активном состоянии в ходе опыта и от одного опыта к другому; 6) отсутствие любых побочных влияний на компоненты реакции и на катализатор, приводящих к возможным изменениям последних в ходе опытов и между ними. Методы, используемые для измерения каталитической активности, можно разбить на две группы: 1) статические, осуществляемые в закрытых системах, 2) проточные, реализуемые в открытых системах. Статические методы. При статических методах процесс осуществляется нестационарно: реактор заполняется реакционной смесью и по изменению ее состава со временем определяется скорость реакции. Измерение активности в проточном реакторе. В реакторе смесь проходит с постоянной скоростью через трубку, заполненную катализатором. Состав смеси изменяется по длине катализатора из-за протекания реакции и из-за продольного перемешивания, но в каждом данном сечении трубки состав смеси постоянен и в первом приближении устанавливается стационарный состав катализатора. Реакторы идеального вытеснения. В реакторе идеального вытеснения отсутствует продольное перемешивание и в каждом сечении, перпендикулярном потоку реагентов, после некоторого начального периода устанавливается стационарный состав реагентов, соответствующий только протеканию каталитической реакции. Реакторы полного смешения. В реакторах полного смешения, или дифференциальных (безградиентных) реакторах, при сохранении постоянного потока реагентов применяют интенсивное перемешивание пространства с катализатором с помощью мешалок или циркуляцию с помощью поршневых, лопастных электромагнитных или других насосов. В результате состав и температура газовой или жидкой смеси над катализатором по всему реактору остается постоянной.

лабораторная работа (1 часа(ов)):

Изучение кинетики процесса изомеризации н-бутена на алюмооксидном катализаторе Кинетику процесса исследуют в соответствии с методическими указаниями [2, стр. 33] на катализаторе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ при температуре 540°C , объеме загрузки 30 см^3 , соотношение сырье:пар=1:4. Расход жидкой бутан-бутеновой фракции: 50, 60, 70, 80 $\text{см}^3/\text{ч}$. Длительность процесса с использованием каждого из перечисленных расходов сырья - 1 час с отбором газовой фазы на хроматографический анализ каждые 20 минут. По результатам хроматографического анализа рассчитывается средний состав контактного газа, скорость реакции изомеризации. С помощью программных пакетов Office Excel, MathCad или Polymath проверяются следующие кинетические модели процесса изомеризации На основании полученных данных делается вывод о кинетической модели, наиболее полно описывающей процесс изомеризации н-бутенов в изобутилен на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Тема 3. Процессы переноса в грануле и слое катализатора

практическое занятие (3 часа(ов)):

Процессы переноса в грануле и слое катализатора Внутридиффузионное торможение скорости реакции Если химическая реакция протекает достаточно быстро, а скорость суммарного процесса лимитируется диффузией реагентов в порах зерна катализатора, то катализ протекает во внутридиффузионной области. Критериями области внутренней диффузии являются: 1) наличие изломов на зависимости константы скорости в аррениусовских координатах; 2) влияние изменения пористости катализатора на активность и селективность; 3) влияние размеров гранул катализатора на скорость реакции: 4) для нанесенных катализаторов в кинетической области скорость пропорциональна количеству нанесенного вещества, в диффузионной области — обычно не пропорциональна. Переходу реакции из области внутренней диффузии в кинетическую область будут способствовать снижение температуры, снижение пористости, изменение распределения активной массы по зерну с преимущественной концентрацией последней во внешнем слое зерна. Перенос вещества в пограничном слое и в широких порах описывается законом Фика с обычным значением D . Однако большинство катализаторов имеет поры преимущественно малого диаметра, внутри которых молекулярная диффузия не подчиняется закону Фика. Если диаметр поры меньше средней длины свободного пробега, молекулы сталкиваются со стенками поры чаще, чем между собой. В такой поре перенос вещества идет по механизму Кнудсена. Во внутридиффузионной области скорость реакции в h раз меньше, чем в области химической кинетики. Также во внутридиффузионной области порядок реакции по компоненту, концентрация которого в глубине зерна близка к нулю, становится средним между порядком реакции в кинетической области и первым порядком; порядок реакции по остальным компонентам снижается в 2 раза, и наблюдаемая энергия активации становится равной половине энергии активации в кинетической области. Пористая структура катализатора оказывает влияние не только на скорость, но и на избирательность процесса. Если побочная реакция представляет собой параллельное превращение исходного вещества, то избирательность зависит от формы кинетических закономерностей обеих реакций. Диффузионное торможение в большей степени снижает скорость той из параллельных реакций, скорость которой быстрее уменьшается с ростом глубины превращения. На практике часто имеют место последовательные реакции, когда полезный продукт является промежуточным и может испытывать реакции, когда полезный продукт является промежуточным и может испытывать дальнейшие превращения с образованием менее ценных веществ. В этом случае диффузионное торможение всегда снижает избирательность.

лабораторная работа (2 часа(ов)):

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Анализ текстурных характеристик железоксидного катализатора дегидрирования изоамиленов методом низкотемпературной адсорбции азота Определение текстурных характеристик железоксидного катализатора выполняется в соответствии с методическим пособием [1, стр. 15] на автоматическом анализаторе Autosorb iQ MP. 1. Ламберов А.А Физико-химические методы исследования гетерогенных катализаторов: руководство к лабораторному практикуму / А.А. Ламберов, С.Р. Егорова, А.Н. Катаев, И.Р. Ильясов, Г.Э. Бекмухамедов ? Казань: Казан. ун-т. 2013. ? 80 с.

Тема 4. Особенности эксплуатации промышленных катализаторов

практическое занятие (3 часа(ов)):

Особенности эксплуатации промышленных катализаторов. Основные требования к промышленному катализатору При создании нового твердого катализатора или усовершенствовании находящегося в эксплуатации катализатора необходимо учитывать следующие основные параметры для катализаторов: физико - механические; химические; эксплуатационно-экономические. К физико-механическим свойствам или параметрам катализатора можно отнести насыпную плотность, истинную плотность, удельную поверхность, средний объем пор и распределение пор по радиусам, фракционный состав, размер частиц, пористость, аморфность или кристалличность, форму частиц, теплоемкость, термостойкость или паротермостойкость, способность к отравлению и регенерации. К химическим параметрам катализаторов можно отнести химический состав, содержание примесей, способность к активированию (про?ецированию, модифицированию) и отравлению ядами, образованию и швов, модификаций и фаз, прививке активаторов к поверхности твердых катализаторов. Пористая структура катализаторов Как правило твердые оксидные, сульфидные и другие частицы катализаторов пронизаны порами. Макропористые тела содержат поры размером от 100 до 200 нм (например, природные алюмосиликаты типа силлиманит, активированные угли). Они имеют удельные поверхности в пределах от 0,5 до 50 м²/г. В этих катализаторах и адсорбентах стенки пор являются гладкими, адсорбция на таких катализаторах соответствует изотерме адсорбции Лэнгмюра. Эти поры играют роль транспортных каналов, и торможение химических процессов внутренней диффузией молекул реагентов в них отсутствует. Мезопористые катализаторы имеют поры радиусом от 1,5 до 200 нм. Эти твердые тела имеют удельную поверхность в пределах 20?500 м²/г. В них имеется широкий набор пор по радиусам. Супермикропористые тела обладают порами в пределах размеров 0,5-1,5 нм. Удельная поверхность таких катализаторов и адсорбентов изменяется в пределах от 500 до 1000 м²/г. К таким адсорбентам относят цеолиталюмосиликатные или цеолит-цирконосилкатные катализато?ры, высокопористые силикагели. Форма и размер гранул катализаторов Твердые адсорбенты и катализаторы готовят, как правило, в форме цилиндриков, колец Рашига, шариков, микросфер, частиц в форме звездочек, дужек, лепешек и многих других форм. Металлические катализаторы готовят в форме сеток или свитых проволочек. В промышленных условиях чаще всего используют катализаторы в таблетированной и микросферической форме. Механическая прочность катализаторов Механическая прочность катализаторов и адсорбентов определяет длительность их пребывания в неизменной форме в реакторах. Катализаторы и адсорбенты могут находиться в реакторах в неподвижном слое, перемешаться в реакторах или находиться в составе ?кипящего? слоя как в реакторах и регенераторах на установках каткрекинга, дегидрирования С3-С5-парафинов, окисления олефинов или во взвешенном слое в лифт-реакторе. Частицы катализаторов подвергаются в пе?риод их эксплуатации истиранию реакционной смесью, растрескиванию истиранию при движении по транспортным линиям за счет соударения их друг с другом и со стенками транспортных линий.

лабораторная работа (2 часа(ов)):

Определение механической прочности микросферического алюмохромового катализатора дегидрирования С3-С5-парафинов Механическую прочность катализатора определяют методом истирания под воздействием высокоскоростной струи воздуха, поступающего под давлением в аппарат для истирания. Используется методика истирания катализатора в течение 60 мин и определении отношения массы фракции менее 71-500 мкм к её содержанию до истирания.

Тема 5. Каталитические реакторы и особенности эксплуатации катализаторов *практическое занятие (3 часа(ов)):*

Каталитические реакторы и особенности эксплуатации катализаторов. Конструкции каталитических реакторов в современных химических производствах, их основные характеристики. Химические реакторы классифицируют по следующим критериям: непрерывность операции, температурный режим и режим движения реагентов. Кроме того, реакторы так же, как и химические процессы, делят по наивысшей температуре процесса на низко- и высокотемпературные; по применяемому давлению – на аппараты, работающие при высоком, повышенном, нормальном и низком (под вакуумом) давлениях. Реакторы также классифицируют по фазовому состоянию реагентов на аппараты для осуществления гомогенных и различных гетерогенных процессов. Непрерывность операции. В реакторы периодического действия реагенты загружаются в начале операции. После определенного времени, необходимого для достижения заданной степени превращения, аппарат разгружают. Основные параметры процесса (концентрация реагентов и продуктов реакции, температура, давление и т. п.) изменяются во времени. Реакторы непрерывного действия от пуска до остановки непрерывно (или систематическими порциями) питаются исходными веществами и из них выводятся продукты реакции. Реакторы полунепрерывного действия характеризуются тем, что сырье поступает в аппарат непрерывно или определенными порциями через равные промежутки времени, а продукты реакции выгружаются периодически. Возможна и непрерывная выгрузка продукта при периодической подаче сырья. Такие реакторы работают в переходном режиме, основные параметры процесса изменяются во времени. Температурный режим (Адиабатические, политермические, изотермические реакторы). Режим движения реагентов (Реактор идеального вытеснения, Реактор полного смешения). Тип загрузки катализатора. Требования к конструкции реакторов. Многообразие химических и физических явлений лежащих в основе разнохарактерных технологических процессов, выдвигает самые различные требования к химическим реакторам. Однако все без исключения реакторы должны удовлетворять следующим основным требованиям: 1) обеспечивать большую производительность при возможно более высокой степени превращения; 2) иметь малые энергетические затраты на транспортировку и перемешивание реагентов; 3) быть достаточно простыми в устройстве и дешевыми, для чего при изготовлении реакторов необходимо использовать черные металлы недорогие изделия силикатной промышленности, пластмассы и т. п.; 4) наиболее полно использовать тепло экзотермических реакций и тепло, подводимое извне, для осуществления эндотермических процессов; 5) быть надежными в работе, по возможности наиболее полно механизированными и обеспечивать автоматическое регулирование процесса. Факторы, определяющие выбор типа реактора. Температура и давление относятся к важнейшим побудителям химических процессов. Оба эти фактора заметно влияют на конструкцию реактора. В зависимости от температуры ведения процесса приходится применять те или иные теплоносители или хладагенты. Тип теплоносителя оказывает большое влияние на конструкцию реактора. Давление среды определяет форму и габаритные размеры аппарата, его материал, конструкцию перемешивающих устройств и сальников. Аппаратам, работающим под высоким давлением, обычно придают цилиндрическую или шаровую форму. Чем выше давление среды, тем меньше диаметр корпуса аппарата. Тепловой эффект реакции определяет необходимость теплообменной поверхности реактора, ее размеры.

лабораторная работа (1 часа(ов)):

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Определение активности алюмохромового катализатора в реакции дегидрирования изобутана. Определение каталитических свойств выполняют на автоматизированной каталитической установке в соответствии с методическим пособием [2, стр.46]. 2. Ламберов А.А. Гетерогенные каталитические реакции в проточных реакторах: руководство к лабораторному практикуму для студентов Химического института им. А.М. Бутлерова КФУ / А.А. Ламберов, С.Р.Егорова, И.Р. Ильясов, М.В. Назаров, Г.Э. Бекмухамедов. – Казань: Казан. ун-т. - 2013. - 77 с.

Тема 6. Особенности эксплуатации катализаторов на примере промышленных каталитических процессов

практическое занятие (3 часа(ов)):

Особенности эксплуатации катализаторов на примере промышленных каталитических процессов Каталитический крекинг нефтяного сырья Важнейшим процессом нефтепереработки является каталитический крекинг. Крекинг углеводородов - наиболее многотоннажный промышленный каталитический процесс. С помощью крекинга из нефти получается жидкое моторное топливо: бензин, дизельное и реактивное топливо. В настоящее время в США - 50% нефти перерабатывается на установках каталитического крекинга. В 1920-х годах в качестве катализатора крекинга применяли суспензию $AlCl_3$ в жидких углеводородах. В 1936 г. в США был запущен первый завод каталитического крекинга на основе предложения Э. Гудри использовать природные глины (монтмориллонит) как катализаторы крекинга. В 1943 г. фирма "Стандард Ойл" (ныне "Экссон-Мобил") ввела в действие производство ТСС (thermo for catalytic cracking) на основе шарикового алюмосиликатного катализатора. В 1949 г. появились первые установки с кипящим слоем микросферического катализатора. Эти установки - процесс FCC (fluid catalytic cracking) - стали главными после перехода промышленности крекинга в 1980-х годах на новое сырье - вакуумный газойль, вместо фракций дизельного топлива. Требования к катализатору. На основании изложенной технологии катализатор крекинга должен отвечать ряду требований: 1) обладать высокой активностью и селективностью, т.е. должен обеспечивать значительную степень превращения сырья в высокооктановый бензин; 2) должен иметь низкую скорость дезактивации и обладать способностью к полной регенерации без потери активности; 3) сохранять стабильность при высокотемпературной регенерации. Кроме того, катализатор не должен образовывать слишком много кокса. Для крекинга в кипящем слое важна также механическая прочность на истирание; 4) катализатор должен быть устойчив к отравлению ядами. Молекулярно-ситовое действие цеолитов в каталитическом крекинге. Молекулярно-ситовый эффект по-разному влияет на молекулы разного размера. Подбором цеолита с разным размером пор можно направить процесс в нужную сторону. Малые и однородные поры препятствуют доступу к внутренним активным центрам для больших молекул. Таким образом, уменьшаются скорость первичных реакций крекинга и общая скорость конверсии. Малые поры увеличивают доступ малых молекул к активным центрам и, следовательно, скорость вторичных реакций. Малые поры также препятствуют всем бимолекулярным реакциям, требующим наличия достаточно большого объема переходного иона карбения. Размер пор обуславливает направление превращений: или диспропорционирование с участием большого иона карбения, или процессы разложения с участием протона. Возрастает и β -крекинг, потому что это мономолекулярный процесс. В результате растет соотношение алканы:олефины. Получение метанола Получение формальдегида Получение окиси этилена

лабораторная работа (2 часа(ов)):

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Приготовление цинкхромовых катализаторов синтеза метанола методом смешения и мокрым методом Приготовление цинкхромовых катализаторов выполняется в соответствии с методическим пособием [3, стр. 17]. У полученных образцов катализаторов определяют насыпной вес [3, стр. 25], статическую емкость по воде [3, стр. 26], величину удельной поверхности [3, стр. 27] 3. Ламберов А.А. Методические разработки к спецпрактикуму по гетерогенному катализу. Для студентов химического факультета / А.А. Ламберов, С.Р.Егорова. - Казань: КГУ, 2006. - 38 с.

4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Введение. Применение гетерогенных катализаторов в химической промышленности	3	1-2	подготовка к устному опросу	6	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
2.	Тема 2. Кинетика каталитических реакций	3	3-4	подготовка к устному опросу	6	устный опрос
3.	Тема 3. Процессы переноса в грануле и слое катализатора	3	5-6	подготовка к контрольной работе	6	контрольная работа
4.	Тема 4. Особенности эксплуатации промышленных катализаторов	3	7-8	подготовка к устному опросу	6	устный опрос
5.	Тема 5. Каталитические реакторы и особенности эксплуатации катализаторов	3	9-10	подготовка к контрольной работе	12	контрольная работа
6.	Тема 6. Особенности эксплуатации катализаторов на примере промышленных каталитических процессов	3	11-12	подготовка к контрольной работе	10	контрольная работа
	Итого				46	

5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

- демонстрацией слайдов с применением мультимедийной техники,
- использованием раздаточного материала с изображением различных графиков зависимостей, принципиальных технологических схем промышленных каталитических процессов, конструкций промышленного оборудования, наглядных материалов.
- использованием интернет-ресурсов различных поисковых систем, таких как www.google.com, www.yandex.ru, www.rushim.ru, www.scirus.com, www.sciencedirect.com, www.springerlink.com, а также сайтов государственных ВУЗов: МГУ, СПбГУ, СПбГТУ, РГТУ им. Губкина, РХТУ им. Менделеева, УНГТУ, ТюмГНГУ, КНИТУ, Scientopica, ChemWeb, ResearchIndex, ScientificWorld
- использованием программных пакетов ChemCad и MathCad

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Тема 1. Введение. Применение гетерогенных катализаторов в химической промышленности

устный опрос , примерные вопросы:

Классификация каталитических процессов и катализаторов по механизму, подбор катализаторов. Основные стадии катализа.

Тема 2. Кинетика каталитических реакций

устный опрос , примерные вопросы:

Кинетика на основе теории стационарных реакций.

Тема 3. Процессы переноса в грануле и слое катализатора

контрольная работа , примерные вопросы:

Процессы переноса вещества и тепла между наружной поверхностью зерен катализатора и реакционным потоком. Задача 1 В проточный реактор поступает смесь CO (0,5 атм) и H₂O (1 атм). Равновесие $K_1 \text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ характеризует при температуре реактора величина константы равновесия $K = 20$, а величина K_1 равна $10^{-2} \text{ атм}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Время нахождения смеси в реакторе 10² с . Рассчитать процент превращения CO и H₂O в CO₂ и H₂ от предельного термодинамически возможного превращения. Задача 2 Каталитическое гидрирование 1-гексена на твердом пористом катализаторе в избытке H₂ протекает по 1-му порядку с $E_{\text{акт.}} = 100$; $T = 500 \text{ К}$. С повышением температуры реакция переходит во внутридиффузионную, затем внешнедиффузионную область. Как изменится $E_{\text{акт.}}$ и кинетический закон реакции? Задача 3 Реакция первого порядка происходит в реакторе идеального перемешивания, степень превращения равна 80%, среднее время пребывания реагента в реакторе равно τ . Эту же реакцию проводят в реакторе идеального вытеснения, время пребывания реагента в реакторе также равно τ , чему равна степень превращения?

Тема 4. Особенности эксплуатации промышленных катализаторов

устный опрос , примерные вопросы:

Основные требования к промышленному катализатору.

Тема 5. Каталитические реакторы и особенности эксплуатации катализаторов

контрольная работа , примерные вопросы:

Конструкции каталитических реакторов в современных химических производствах, их основные характеристики. Требования к конструкции реакторов. Факторы, определяющие выбор типа реактора.

Тема 6. Особенности эксплуатации катализаторов на примере промышленных каталитических процессов

контрольная работа , примерные вопросы:

Гидрирование непредельных соединений для очистки мономеров для промышленности СК. Особенности эксплуатации катализаторов. Гидрокрекинг, изомеризация, алкилирование. Особенности эксплуатации катализаторов. Гидродесульфуризация сернистых соединений, дожиг топливных газов, окислительное хлорирование. Особенности эксплуатации катализаторов. Задача 1 Определить выход бензина при каталитическом крекинге в кипящем слое катализатора, если известно: сырьем служит керосино-газойлевая фракция плотностью $d_{420} = 0,870$; глубина превращения сырья $X = 0,62$; температура в реакторе 468^oC. Производительность установки каталитического крекинга с подвижным слоем катализатора составляет 1000 т/сут по сырью. Определить диаметр реактора и высоту слоя катализатора в нем, если известно: сырьем установки является газойль плотностью $d_{420} = 0,878$; выход кокса $X_k = 5,9$ % масс. на сырье; объемная скорость подачи сырья $\omega = 2,0 \text{ ч}^{-1}$ на катализаторе $X'_k = 2,0$ % масс.; линейная скорость движения катализатора в реакторе $u = 0,008 \text{ м/с}$.

Тема . Итоговая форма контроля

Примерные вопросы к зачету:

Контрольный опрос 1

Билет ♦ 1 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Определения "катализа".
2. Параметры кинетических экспериментов. Их варьирование.
3. Кинетическая область протекания реакции.

Контрольный опрос 1

Билет ♦ 2 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Основные стадии катализа.
2. Время контакта реагента с катализатором.
3. Внешне- и внутридиффузионная область протекания реакции.

Контрольный опрос 1

Билет ♦ 3 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Адсорбция ее разновидности.
2. Этапы кинетических исследований.
3. Критерии области внутренней диффузии.

Контрольный опрос 1

Билет ♦ 4 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Классификация каталитических процессов по механизму действия катализаторов.
2. Критерии пригодности метода для исследования каталитических свойств.
3. Модуль Тиле.

Контрольный опрос 1

Билет ♦ 5 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Окислительно-восстановительные каталитические реакции.
2. Статический метод исследования каталитической активности.
3. Способы перевода катализа из диффузионной в кинетическую область.

Контрольный опрос 1

Билет ♦ 6 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Реакции кислотно-основного взаимодействия.
2. Измерение активности в проточном реакторе.
3. Исследование пористой структуры катализаторов.

Контрольный опрос 2

Билет ♦ 1 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Основные требования к промышленному катализатору.
2. Классификация реакторов по непрерывности операции. Реакторы периодического действия.

Контрольный опрос 2

Билет ♦ 2 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Пористая структура катализаторов. Классификация материалов по пористости.
2. Классификация реакторов по непрерывности операции. Реакторы непрерывного действия.

Контрольный опрос 2

Билет ♦ 3 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Форма и размер гранул катализаторов.
2. Классификация реакторов по температурному режиму. Изотермические реакторы.

Контрольный опрос 2

Билет ♦ 4 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Механическая прочность катализатора.
2. Классификация реакторов по температурному режиму. Адиабатические реакторы.

Контрольный опрос 2

Билет ♦ 5 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Основные требования к промышленному катализатору.
2. Классификация реакторов по температурному режиму. Политермические реакторы.

Контрольный опрос 2

Билет ♦ 6 "Особенности эксплуатации катализаторов"

1. Пористая структура катализаторов. Классификация материалов по пористости.
2. Классификация реакторов по режиму движения реагентов. Реактор идеального вытеснения.

Контрольный опрос 3

Билет ♦ 1 "Особенности эксплуатации катализаторов"

Каталитический крекинг нефтяного сырья. Назначение процесса, технология, катализатор, рабочие параметры работы реактора (температура, давление, подача сырья).

Контрольный опрос 3

Билет ♦ 2 "Особенности эксплуатации катализаторов"

Получение метанола. Назначение процесса, технология, катализатор, рабочие параметры работы реактора (температура, давление, подача сырья).

Контрольный опрос 3

Билет ♦ 3 "Особенности эксплуатации катализаторов"

Получение формальдегида. Назначение процесса, технология, катализатор, рабочие параметры работы реактора (температура, давление, подача сырья).

Контрольный опрос 3

Билет ♦ 4 "Особенности эксплуатации катализаторов"

Получение окиси этилена. Назначение процесса, технология, катализатор, рабочие параметры работы реактора (температура, давление, подача сырья).

Контрольный опрос 3

Билет ♦ 5 "Особенности эксплуатации катализаторов"

Каталитический крекинг нефтяного сырья. Назначение процесса, технология, катализатор, рабочие параметры работы реактора (температура, давление, подача сырья).

Контрольный опрос 3

Билет ♦ 6 "Особенности эксплуатации катализаторов"

Получение метанола. Назначение процесса, технология, катализатор, рабочие параметры работы реактора (температура, давление, подача сырья).

Тесты для опросов и контрольных работ по предмету
"Особенности эксплуатации катализаторов"

Тема 1. Введение. Применение гетерогенных катализаторов в химической промышленности

1. Катализатор по?сле каждого цикла превращений реагентов в продукты:

1) регенерируется; 2) не восстанавливает своих свойств

2. Количество катализатора в большинстве случаев:

1) находится в стехиометрическом отношении с реагентами;

2) много меньше количества реагентов;

3) много больше количества реагентов

3. При отрицательном катализе катализатор:

1) ускоряет реакцию; 2) замедляет реакцию; 3) не изменяет скорости реакции

4. Что не является стадией гетерогенно каталитической реакции:

1) диффузия компонентов к катализатору;

2) адсорбция;

3) каталитическая реакция;

- 4) десорбция продуктов реакции;
- 5) обратная диффузия продуктов реакции.
5. В случае внешнедиффузионной области протекания реакции скорость лимитируется:
 - 1) химическими превращениями на поверхности катализатора;
 - 2) подводом реагентов из газа или жидкости к наружной поверхности или отводом продуктов от наружной поверхности;
 - 3) переносом вещества в порах внутри зерна катализатора
6. Адсорбцией называют:
 - 1) понижение концентрации молекул, атомов или ионов вблизи поверхности твердого тела;
 - 2) повышение концентрации молекул, атомов или ионов вблизи поверхности твердого тела;
 - 3) повышение концентрации молекул, атомов или ионов вблизи поверхности жидкости
7. К окислительно-восстановительным каталитическим реакциям относятся следующие процессы:
 - 1) окисление; 2) восстановление; 3) гидрирование; 4) дегидрирование; 5) разложение кислородсодержащих соединений; 6) крекинг; 7) гидратация; 8) дегидратация;
 - 8) гидролиз; 9) изомеризация
8. К кислотно-основным каталитическим реакциям относятся следующие процессы:
 - 1) окисление; 2) восстановление; 3) гидрирование; 4) дегидрирование; 5) разложение кислородсодержащих соединений; 6) крекинг; 7) гидратация; 8) дегидратация;
 - 8) гидролиз; 9) изомеризация
9. В гетеролитических реакциях:
 - 1) происходит разделение электронов двухэлектронной пары;
 - 2) не происходит разделения электронов двухэлектронной пары
10. Полимеризация этилена на катализаторе Циглера-Натты ($TiCl_3 + Al(C_2H_5)_3$) протекает по:
 - 1) окислительно-восстановительному механизму;
 - 2) кислотно-основному механизму;
 - 3) координационному механизму

Тема 2. Кинетика каталитических реакций

1. Как изменяется время контакта при проведении реакции в замкнутом объеме?
 - 1) варьированием скорости потока реагента;
 - 2) варьированием количества катализатора;
 - 3) варьированием времени протекания реакции
2. Что не является критериями пригодности выбираемого метода исследования:
 - 1) точность результатов, достаточная для их обработки;
 - 2) минимальное число каталитических экспериментов, дающих информацию о кинетике процесса;
 - 3) стабильность температуры в течение всего каталитического опыта;
 - 4) варьирование давления в широком диапазоне в течение всего каталитического опыта;
 - 5) возможность воспроизведения условий предшествующих опытов;
 - 6) легкость изменения условий опытов при переходе от одного к другому;
 - 7) сохранение катализатора в стабильном активном состоянии в ходе опыта и от одного опыта к другому;
 - 6) отсутствие любых побочных влияний на компоненты реакции и на катализатор, приводящих к возможным изменениям последних в ходе опытов и между ними.
3. Для определения каталитической активности необходимо измерить скорость реакции в заданных условиях:
 - 1) при отсутствии диффузионных искажений; 2) при наличии диффузионных искажений

4. При статических методах определения каталитической активности состав реакционной смеси:
 - 1) изменяется во времени; 2) не изменяется во времени
5. Скорость реакции равна производной концентрации компонента реакционной смеси по времени:
 - 1) в случае постоянства объема реакционной смеси; 2) не зависит от объема реакционной смеси
6. При постоянной активности катализатора состав реакционной смеси в определенном участке реактора:
 - 1) не изменяется; 2) изменяется
7. Размерность объемной скорости подачи сырья в реактор:
 - 1) м³/ч; 2) ч⁻¹; 3) м/с
8. В реакторе идеального вытеснения:
 - 1) отсутствует продольное перемешивание;
 - 2) создается интенсивное продольное перемешивание
9. Режим идеального вытеснения справедлив если:
 - 1) диаметр трубки по крайней мере в 10 раз больше размера зерен катализатора;
 - 2) диаметр трубки по крайней мере в 20 раз больше размера зерен катализатора;
 - 3) диаметр трубки по крайней мере в 30 раз больше размера зерен катализатора
10. Концентрация исходного реагента над катализатором в реакторе полного смешения:
 - 1) уменьшается по мере движения от входа сырья к выходу продуктов реакции;
 - 2) одинакова во всем объеме реакционной смеси
11. Принцип работы проточно-циркуляционной каталитической установки обеспечивает снятие искажений, связанных с
 - 1) влиянием внешней диффузии реагентов;
 - 2) неоднородностью температуры по слою катализатора;
 - 3) влиянием неравномерности прохождения реакционной смеси по сечению реактора
12. В импульсном методе информацию о кинетике каталитической реакции получают на основании:
 - 1) формы импульса ввода реагентов;
 - 2) изменений формы импульса реагентов после прохождения через реактор;
 - 3) времени выхода импульса из колонки;
 - 4) площадь импульса

Тема 3. Процессы переноса в грануле и слое катализатора

1. Глубина проникновения реакции в слой увеличивается:
 - 1) со снижением эффективного коэффициента диффузии и с уменьшением константы скорости;
 - 2) с ростом эффективного коэффициента диффузии и с уменьшением константы скорости;
 - 3) с ростом эффективного коэффициента диффузии и с ростом константы скорости
2. Во внутридиффузионной области скорость реакции, характеризующейся степенным уравнением $r = kr^n$, равна:
 - 1) скорости диффузии;
 - 2) скорости химической реакции;
 - 3) среднему арифметическому из скорости химической реакции и скорости диффузии
 - 4) среднему геометрическому из скорости химической реакции и скорости диффузии

3. Наличие изломов на зависимости константы скорости в аррениусовских координатах является признаком:
 - 1) кинетической области;
 - 2) внутридиффузионной области;
 - 3) внешнедиффузионной области
4. Для нанесенных катализаторов в кинетической области скорость:
 - 1) обратно пропорциональна количеству нанесенного активного компонента;
 - 2) пропорциональна количеству нанесенного вещества;
 - 3) не зависит от количества нанесенного вещества
5. Условие Кнудсеновской диффузии:
 - 1) диаметр поры больше средней длины свободного пробега;
 - 2) диаметр поры меньше средней длины свободного пробега;
 - 3) диаметр поры равен средней длине свободного пробега
6. Активированная диффузия наблюдается в:
 - 1) макропорах; 2) микропорах; 3) мезопорах; 4) ультрамикропорах
7. Во внутридиффузионной области скорость реакции:
 - 1) в h (модуль Тиле) раз меньше, чем в области химической кинетики;
 - 2) в h (модуль Тиле) раз больше, чем в области химической кинетики;
 - 3) равен таковой в области химической кинетики
8. Диффузионное торможение в большей степени снижает скорость той из параллельных реакций:
 - 1) скорость которой быстрее уменьшается с ростом глубины превращения;
 - 2) скорость которой медленнее уменьшается с ростом глубины превращения;
 - 3) скорость которой не изменяется с ростом глубины превращения
9. В случае последовательных реакций, когда полезный продукт является промежуточным, диффузионное торможение:
 - 1) увеличивает избирательность;
 - 2) снижает избирательность;
 - 3) не изменяет избирательность

Тема 4. Особенности эксплуатации промышленных катализаторов

1. Макропористые тела с размером пор 100-200 нм имеют удельную поверхность:
 - 1) 20-500 м²/г; 2) 0,5-50 м²/г; 3) 500-1000 м²/г
2. Цеолиталюмосиликаты, цеолит-цирконосилкаты, высокопористые силикагели относятся к:
 - 1) макропористым материалам; 2) мезопористым; 3) микропористым
3. Металлические катализаторы преимущественно готовят в форме:
 - 1) цилиндров; 2) сеток; 3) колец Рашига; 4) микросфер
4. Перепад давления слоя при переходе от катализатора в форме цилиндров к кольцам Рашига:
 - 1) увеличивается; 2) не изменяется; 3) уменьшается
5. Размер частиц катализатора, используемого в псевдооживленном слое:
 - 1) 6-8 мм; 2) 2-3 мм; 3) 10-150 мкм

Тема 5. Каталитические реакторы и особенности эксплуатации катализаторов.

1. Реакторы, не имеющие теплообмена с окружающей средой, называются:
 - 1) изотермическими; 2) адиабатическими; 3) политермическими
2. Движущая сила процесса ΔS_k в аппаратах полного смешения по сравнению с реактором вытеснения:

- 1) больше; 2) меньше; 3) одинакова
3. Увеличение размера зерен в стационарном слое катализатора:
 - 1) снижает гидравлическое сопротивление слоя;
 - 2) увеличивает гидравлическое сопротивление слоя;
 - 3) не изменяет гидравлического сопротивления слоя
4. Давление реакционной среды определяет:
 - 1) форму реактора; 2) размеры реактора; 3) материал реактора
5. Чем больше давление в реакторе, тем его диаметр:
 - 1) больше; 2) меньше

Тема 6. Особенности эксплуатации катализаторов на примере промышленных каталитических процессов

1. Процесс каталитического крекинга проводится в:
 - 1) стационарном слое катализатора;
 - 2) движущемся слое катализатора;
 - 3) псевдооживленном слое катализатора
2. Каталитический крекинг углеводородов приводит к:
 - 1) синтезу более крупных молекул, чем в сырье;
 - 2) расщеплению крупных молекул сырья;
 - 3) только к изомеризации существующих молекул;
 - 4) обильному газообразованию
3. Активность катализатора крекинга падает из-за:
 - 1) высокой температуры реакции;
 - 2) растворения поверхности в сырье;
 - 3) отложений кокса на поверхности;
 - 4) химической дезактивации поверхности
4. В качестве катализатора крекинга используется:
 - 1) железная сетка; 2) цеолитсодержащий алюмосиликат; 3) оксид алюминия; 4) силикагель
5. Процесс каталитического крекинга протекает по:
 - 1) радикально-цепному механизму; 2) карбоний-ионному механизму
6. Получение метанола из синтез-газа является:
 - 1) экзотермической реакцией; 2) эндотермической реакцией
7. Преимущественно в качестве катализатора для получения метанола из синтез-газа используют:
 - 1) цинк-хромовый катализатор; 2) Fe_2O_3 ; 3) медный катализатор, активированный Cr_2O_3
8. В качестве катализатора синтеза формальдегида окислением метанола используется:
 - 1) цинк-хромовый катализатор;
 - 2) окисный железо-молибденовый катализатор;
 - 3) металлическая медь, на пористом инертном носителе;
 - 4) палладий на алюмооксидном носителе
9. Реакция окисления этилена до окиси этилена является:
 - 1) экзотермической; 2) эндотермической
10. В качестве катализатора окисления этилена используется:
 - 1) цинк-хромовый катализатор; 2) металлическая медь, на пористом инертном носителе;
 - 3) палладий на алюмооксидном носителе; 4) серебро на алюмооксидном носителе

7.1. Основная литература:

1. Миначев, Хабиб Минаевич. Избранные труды: гетерогенный катализ. Нефтехимия. Каталитический органический синтез / Х. М. Миначев; Рос. акад. наук, Ин-т орган. химии им. Н. Д. Зелинского; ред.-сост. д.х.н., проф. Н. Я. Усачев; предисл. чл.-кор. РАН А. Л. Лапидуса и д.х.н., проф. Н. Я. Усачева. Москва: URSS: [ЛИБРОКОМ, 2011]. 844 с
2. Боруцкий, Павел Николаевич. Каталитические процессы получения углеводородов разветвленного строения, Изомерия и катализ синтеза углеводородов разветвленного строения / П. Н. Боруцкий. - Санкт-Петербург: Професионал, 2010. 745 с.
4. Чоркендорф, Иб (1955-) . Современный катализ и химическая кинетика / И. Чоркендорф, Х. Наймантсведрайт ; пер. с англ. В. И. Ролдугина. 2-е изд. Долгопрудный : Интеллект, 2013. 500 с.
5. Тимофеев, Владимир Савельевич. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Химическая технология и биотехнология" / В. С. Тимофеев, Л. А. Серафимов, А. В. Тимошенко. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 2010. 406 с.
6. Бокштейн Б.С., Менделев М.И. Физическая химия: термодинамика и кинетика. - М.: МИСИС, 2012.- 258 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=47443

7.2. Дополнительная литература:

1. Харлампици Х.Э. Общая химическая технология. Методология проектирования химико-технологических процессов. - 2-е изд., перераб. - СПб.: Лань, 2013. - 448 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=32826
2. Кузнецова И.М., Харлампици Х. Э. Общая химическая технология. Основные концепции проектирования ХТС. - 2-е изд., перераб. - СПб.: Лань, 2014. - 384 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=45973
3. Закгейм А. Ю. Общая химическая технология: введение в моделирование химико-технологических процессов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Ю. Закгейм. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Логос, 2012. - 304 с. - (Новая университетская библиотека). <http://znanium.com/bookread.php?book=468690>
4. Гетерогенные каталитические реакции в проточных реакторах: руководство к лабораторному практикуму для студентов Химического института им. А.М. Бутлерова КФУ / А.А. Ламберов и др. - Казань: Казан. Ун-т, 213. - 77 с.
5. Физико-химические методы исследования гетерогенных катализаторов: руководство к лабораторному практикуму / авт.-сост. А.А. Ламберов, С.Р. Егорова, А.Н. Катаев и др. - Казань: Казан. Ун-т, 2013. - 80с.
7. Модернизация катализаторов и технологии синтеза изопрена на ОАО "Нижнекамскнефтехим" / А.А. Ламберов, Х.Х. Гильманов. - Казань: Казан. Ун-т, 2012. - 404 с.

7.3. Интернет-ресурсы:

- Кинетика и катализ, периодический журнал - <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=712147>
- Нефтехимия, периодический журнал - <http://elibrary.ru/issues.asp?id=7920>
- Общая химическая технология: введение в моделирование химико-технологических процессов - <http://znanium.com/bookread.php?book=468690>
- Общая химическая технология. Методология проектирования химико-технологических процессов - http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=32826
- Общая химическая технология. Основные концепции проектирования ХТС - http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=45973

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)

Освоение дисциплины "Особенности эксплуатации катализаторов" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "БиблиоРоссика", доступ к которой предоставлен студентам. В ЭБС "БиблиоРоссика" представлены коллекции актуальной научной и учебной литературы по гуманитарным наукам, включающие в себя публикации ведущих российских издательств гуманитарной литературы, издания на английском языке ведущих американских и европейских издательств, а также редкие и малотиражные издания российских региональных вузов. ЭБС "БиблиоРоссика" обеспечивает широкий законный доступ к необходимым для образовательного процесса изданиям с использованием инновационных технологий и соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, УМК, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.

- 1) Средства визуальной информации: проектор, ноутбук;
- 2) Раздаточный и наглядный материал;
- 3) программное обеспечение пакеты MathCad, ChemCad

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 04.04.01 "Химия" и магистерской программе Нефтехимия и катализ .

Автор(ы):

Ламберов А.А. _____

"__" _____ 201__ г.

Рецензент(ы):

Соломонов Б.Н. _____

"__" _____ 201__ г.