

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по дисциплине

«Основы гетерогенного катализа и производство катализаторов»

Направление подготовки	18.03.01 Химическая технология
Направленность (профиль)	Технология неорганических веществ и минеральных удобрений
Форма обучения	Очная
Год начала обучения	2026
Реализуется	3 семестре

Ставрополь
2026 г.

Цель: изучения дисциплины «Основы гетерогенного катализа и производство катализаторов» является формирование набора общепрофессиональных и профессиональных компетенций выпускника по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология. Основные задачи изучения дисциплины:

- заложить основу знаний по теории и практике применения гетерогенных катализаторов и адсорбентов в различных процессах переработки нефти и газа;
- дать представления о составе, строении, свойствах и механизмах действия, наиболее распространенных промышленных каталитических систем;
- сформировать научный подход к подбору катализаторов для конкретных процессов;

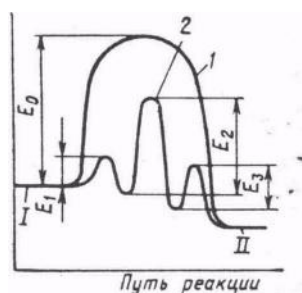
Темы практических работ:

1. Основные понятия гетерогенного катализа и механизм его протекания
2. Теории гетерогенного катализа и их применимость к различным процессам нефте- и газопереработки
3. Основные виды носителей гетерогенных каталитических систем
4. Взаимодействие катализаторов с реакционной средой. Отравление катализатора
5. Классификация катализаторов. Основные технологические характеристики гетерогенных катализаторов
6. Методы исследования катализаторов и контроль качества 1,5
7. Общие сведения о цеолитах. Природа каталитической активности цеолитов
8. Технология производства цеолитов
9. Основные каталитические процессы и катализаторы, применяемые в них. Каталитический крекинг.

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КАТАЛИЗЕ

Катализаторы – это вещества, которые, многократно вступая в промежуточное взаимодействие с участниками реакции, изменяют ее механизм и увеличивают скорость. При этом они восстанавливают свой химический состав после каждого цикла промежуточных взаимодействий.

Влияние катализатора на механизм химической реакции можно пояснить на примере реакции $A+B \rightarrow D$, имеющей без катализатора энергию активации E_0 . Рассмотрим энергетическую диаграмму этой реакции:



I и II - энергетические уровни исходных реагентов и продуктов реакции; 1 - путь реакции без катализатора; 2 - путь каталитической реакции.

Ход реакции без катализатора на энергетической диаграмме изображен кривой 1. В присутствии катализатора механизм реакции изменяется, и она протекает через несколько последовательных стадий в соответствии с кривой 2. Например, первой стадией может быть образование промежуточного активированного комплекса АКт:

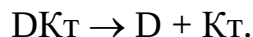


Затем активированный комплекс реагирует со вторым реагентом с образованием комплекса катализатора и продукта:



Последней стадией является разложение комплекса DKт с образованием продукта D и высвобождением катализатора для нового каталитического

цикла:



Каждая из этих последовательных стадий характеризуется своими значениями энергии активации E_1 , E_2 , E_3 , но, как правило, высота каждого из этих потенциальных барьеров ниже энергии активации E_0 . Таким образом, в присутствии катализатора реакция протекает по энергетически более выгодному пути, что позволяет проводить процесс с большей скоростью.

Исходное (I) и конечное (II) энергетические состояния реакционной системы в присутствии катализатора и без него остаются одинаковыми. Следовательно, *катализатор не может изменить состояние химического равновесия, которое не зависит от пути реакции*. Роль катализатора состоит лишь в изменении скорости достижения состояния равновесия. Катализатор может увеличивать скорость только тех процессов, которые разрешены термодинамически, но не может инициировать термодинамически невозможные реакции.

Некоторые химические реакции без катализаторов практически неосуществимы из-за слишком большой энергии активации. Казалось бы, что для преодоления высокого энергетического барьера можно повысить кинетическую энергию молекул, т.е. увеличить температуру. Но для многих обратимых экзотермических реакций повышение температуры приводит к смещению равновесия в обратную сторону и делает реакцию неразрешенной термодинамически. В таких случаях применение катализатора не только оправдано, но и необходимо. Катализатор снижает энергию активации реакции и позволяет тем самым проводить ее при существенно более низких температурах. Очень важна роль катализаторов в осуществлении сложных реакций, так как катализаторы обладают способностью избирательно влиять

на скорость только какой-то одной нужной реакции.

Каталитические процессы подразделяют на две большие группы - гомогенные и гетерогенные. Наибольшее распространение в промышленности получили гетерогенно-каталитические процессы. В свою очередь, подавляющее большинство гетерогенно-каталитических процессов такие, в которых границей раздела фаз служит поверхность твердого катализатора, находящегося в газообразной или жидкой реакционной среде. Существенным преимуществом таких процессов является простота разделения продуктов реакции и частиц катализатора для повторного использования катализатора.

Технологические характеристики твердых катализаторов

Подбор катализаторов для проведения промышленных процессов - задача чрезвычайно сложная. Катализаторы очень специфичны по отношению к различным химическим реакциям. Твердые катализаторы - это, как правило, высокопористые вещества с развитой внутренней поверхностью, характеризующиеся определенной пористой и кристаллической структурой, активностью, селективностью и рядом других технологических характеристик. Наиболее важные характеристики твердых катализаторов:

1) Активность - это мера ускоряющего воздействия катализатора по отношению к данной реакции. При сравнении разных катализаторов обычно выбирают более активный, если он удовлетворяет основным технологическим требованиям. В связи с большим разнообразием каталитических процессов не существует единого количественного критерия активности. Это связано с тем, что применение различных катализаторов даже для одной и той же химической реакции может по-разному изменить ее механизм. Как правило, применение катализатора приводит к изменению и порядка реакции, и энергии активации, и предэкспоненциального множителя. Количественным критерием

активности катализатора для данной реакции может служить, например, константа скорости, измеренная для разных катализаторов в сопоставимых условиях. Такой подход применим, если для всех сравниваемых катализаторов данной группы остается одинаковым порядок реакции. Иногда сравнивают катализаторы по скорости реакции или по степени превращения реагентов в стандартных условиях, по количеству реагентов, вступающих во взаимодействие в единицу времени на единице поверхности катализатора (производительности или напряженности катализатора) и т.п.

2) Селективность это способность катализатора избирательно ускорять целевую реакцию при наличии нескольких побочных. Сложные каталитические реакции могут протекать по нескольким термодинамически возможным направлениям с образованием большого числа различных продуктов. Преобладающее направление зависит от используемого катализатора, причем не всегда ускоряется процесс, термодинамически самый выгодный из нескольких возможных. Количественно селективность катализатора можно оценить как селективность процесса - интегральную или дифференциальную. Селективность зависит не только от выбранного катализатора, но и от условий проведения процесса, от области протекания гетерогенно-каталитического процесса и т.д.

3) Температура зажигания - это минимальная температура, при которой технологический процесс начинает идти с достаточной для практических целей скоростью. Понятие "зажигание", означает, что при увеличении температуры выше предела, равного $T_{\text{зж}}$, происходит резкое, скачкообразное увеличение скорости реакции. Так как каждый катализатор характеризуется своими кинетическими параметрами, то и температуры зажигания будут различными для разных катализаторов. С технологической точки зрения

лучше использовать катализаторы с низкой температурой зажигания, что позволяет снизить энергетические затраты на предварительный нагрев реакционной смеси. Особенно важно иметь невысокую температуру зажигания катализатора при проведении обратимых экзотермических реакций, тогда невысокие температуры проведения процесса позволяют сместить равновесие реакции в сторону образования продуктов.

4) Пористая структура катализатора - характеризуется размерами и формой пор, порозностью (отношением свободного объема пор к общему объему), удельной поверхностью (поверхностью, приходящейся на единицу массы или объема). При выборе твердого вещества, которое должно служить активным катализатором гетерогенных газовых реакций, важную роль играет доступность поверхности. Чем больше для данного катализатора поверхность, доступная для реагирующих молекул, тем выше скорость расходования реагентов в единицу времени при использовании того же количества катализатора. Промышленные катализаторы всегда имеют развитую внутреннюю поверхность, иначе весьма небольшая внешняя поверхность быстро подвергалась бы отравлению, и катализатор вскоре утрачивал бы активность. Чем выше пористость катализатора и чем меньше диаметр пор, тем больше внутренняя поверхность. Однако распределение пор по размерам может оказаться таким, что часть поверхности катализатора окажется недоступной для молекул большого размера и, кроме того, скорость превращения реагентов в конечные продукты может уменьшаться вследствие затруднения диффузии реагентов внутри пор. Для получения катализаторов с развитой пористой структурой используют специальные методы их приготовления.

5) Кристаллическая структура катализатора - различные

кристаллические модификации одного и того же вещества могут обладать сильно отличающейся каталитической активностью. Например, переход γ - Al_2O_3 в α - Al_2O_3 на несколько порядков снижает активность этого вещества как катализатора.

Промотирование и отравление катализаторов

Часто введение очень небольшого количества (долей процента) какой-либо посторонней добавки к основному катализатору приводит либо к резкому повышению его активности, либо, наоборот, к снижению активности на несколько порядков. В первом случае говорят о промотировании, во втором - об отравлении катализатора. Механизм промотирования твердых катализаторов может быть различным. Добавки могут вступать с основным катализатором в химическое взаимодействие, образуя на поверхности продукты, обладающие более высокой каталитической активностью. Они могут изменять условия взаимодействия с реагентами в местах контакта основного компонента и промотора, а также увеличивать дисперсность или стабилизировать пористую и кристаллическую структуру катализатора и т.п.

Практическому использованию каталитических процессов часто препятствует снижение активности катализатора при воздействии на него веществ, называемых каталитическими ядами. Это объясняется в соответствии с теорией активных центров, согласно которой каталитическую активность проявляет не вся поверхность катализатора, а лишь некоторые ее участки, обладающие определенным энергетическим и геометрическим соответствием реагирующим молекулам - активные центры. Каталитические яды блокируют эти активные центры, образуя с ними поверхностные химические соединения.

Отравление бывает обратимым и необратимым. При обратимом

отравлении активность катализатора постепенно восстанавливается, если в реакционной смеси больше не содержится каталитического яда. При необратимом отравлении действием свежей реакционной смеси активность восстановить не удастся. Одно и то же вещество может вызвать как обратимое, так и необратимое отравление в зависимости от продолжительности его действия, концентрации в реакционной смеси, температуры процесса. С целью удлинения срока службы промышленных катализаторов в технологических схемах предусматривают тщательную очистку реагирующих веществ от примесей, являющихся каталитическими ядами.

В ряде случаев катализатор отравляется побочными продуктами реакции. Так, в реакциях органических соединений (крекинга, дегидрирования, изомеризации) отравление катализаторов часто происходит в результате образования высокоуглеродистых полимерных соединений - так называемого кокса, покрывающего поверхность катализатора. Для его удаления цикл каталитической реакции сменяют циклом регенерации - катализатор продувают при высокой температуре воздухом для выжигания кокса.

Основные стадии гетерогенно-каталитических процессов

Гетерогенно-каталитическая реакция на поверхности твердого катализатора - это сложный многостадийный процесс. Наблюдаемая общая скорость каталитической реакции зависит от относительных скоростей нескольких различных по своей физической и химической природе стадий. Основные стадии взаимодействия газообразных реагентов с зерном пористого катализатора:

- 1) диффузия газообразных реагентов из основного потока к внешней поверхности зерна катализатора через газовую пленку, в которой концентрация реагентов ниже, а концентрация продуктов выше, чем в потоке

(внешняя диффузия);

2) диффузия молекул реагентов внутрь пор катализатора (внутренняя диффузия);

3) адсорбция молекул реагентов на внутренней поверхности катализатора, протекающая в форме физической адсорбции или хемосорбции. Хемосорбция заключается в образовании активированного комплекса реагента и катализатора и определяет специфичность действия катализатора в реакции;

4) поверхностная химическая реакция в результате перегруппировки активированного комплекса или взаимодействия молекул одного адсорбированного реагента с молекулами другого;

5) десорбция образовавшихся продуктов реакции с внутренней поверхности катализатора;

6) диффузия продуктов внутри пор катализатора к его внешней поверхности;

7) диффузия продуктов от поверхности зерна катализатора в общий поток.

Общая скорость гетерогенно-каталитического процесса лимитируется наиболее медленной из перечисленных элементарных стадий. Иногда наиболее медленной стадией оказывается химическое взаимодействие на поверхности катализатора, а иногда – диффузионные процессы. В зависимости от лимитирующей скорости стадии различают каталитические процессы, происходящие в кинетической, внутридиффузионной и внешнедиффузионной области.

В кинетической области (стадии 3-5) константа скорости процесса не зависит от коэффициента диффузии. Кинетическое уравнение должно

учитывать влияние основных технологических параметров. Для газообразных реагентов

$$u = k_0 \cdot e^{-E/RT} \cdot \Delta p \cdot P^n \cdot \beta_0,$$

где Δp – движущая сила процесса (разность концентраций, парциальных давлений), выраженная в парциальных давлениях реагентов при $P = 0,1$ МПа; P – безразмерное давление (отношение рабочего давления к нормальному атмосферному); n – общий порядок реакции; β_0 – коэффициент пересчета к нормальным давлению и температуре. В кинетической области протекают, как правило, процессы на малоактивных катализаторах с малыми размерами зерен и крупными порами при турбулентном режиме движения потока реагентов и сравнительно низких температурах. Увеличение скорости каталитических процессов в кинетической области достигается, прежде всего, повышением температуры.

Во внутридиффузионной области (стадии 2 и 6) общая скорость процесса определяется коэффициентами диффузии реагентов или продуктов в порах зерна катализатора. Время, необходимое для диффузии газообразного компонента в поры катализатора на глубину l , можно определить по формуле Эйнштейна

$$\tau = l^2/2D_0,$$

где D_0 – коэффициент диффузии. Величина D_0 зависит от соотношения размера пор катализатора и длины свободного пробега молекул. Внутридиффузионная область характерна для проведения процессов в стационарном (фильтрующем) слое катализатора. Ускорить процессы можно путем применения катализаторов с меньшим размером зерен и более крупными порами. Однако при увеличении размеров пор резко уменьшается удельная поверхность катализатора. Поэтому надо находить оптимальную

структуру катализатора, при которой поры достаточно доступны для участников реакции.

Во внешнедиффузионной области (стадии 1 и 7) общая скорость процесса определяется коэффициентами диффузии реагентов или продуктов в газообразном потоке. По закону Фика при постоянстве условий

$$u = dG/d\tau = - D_s \cdot S \cdot \lambda c/dz,$$

где G – масса вещества, перенесенная за время τ в направлении z перпендикулярном поверхности зерна катализатора при концентрации c диффундирующего компонента в общем газовом потоке; S – свободная поверхность зерен; D_s – коэффициент диффузии, который является результатом молекулярной и турбулентной диффузии и обычно определяется опытным путем. Во внешнедиффузионной области протекают процессы на высокоактивных катализаторах. Для увеличения скорости процесса применяют высокие линейные скорости потока реагентов, создают его турбулизацию путем перемешивания.

ПРОИЗВОДСТВО КАТАЛИЗАТОРОВ

Производство катализаторов нефтепереработки в России осуществляют на ОАО «Газпромнефть-Омский нефтеперерабатывающий завод», ООО «Салаватский катализаторный завод», Компания «КНТ Групп» (ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов» и ООО «Стерилитамакский завод катализаторов»), ЗАО «Промышленные катализаторы» в Рязани, ООО «Новокуйбышевский завод катализаторов», ОАО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза». Основные научные и научно-производственные организации России, занимающиеся разработкой катализаторов нефтепереработки: Институт катализа им. Г.К. Борескова СО

РАН Новосибирск), ООО «Компания КАТАХИМ» Новокуйбышевск), ООО Научно-производственная фирма «Олкат» (Санкт-Петербург) и ОАО «НПП»Нефтехим» (Краснодар).

Значительный сектор в потреблении катализаторов составляют импортные катализаторы, поставляемые компаниями и фирмами BASF Catalysts, Grace, Axens, Albermarle Catalyst Company, UOP и другие.

В настоящее время лидирует подход к приготовлению катализаторов, основанный на общности их химических свойств.

Классификация методов получения катализаторов по наиболее характерным особенностям их синтеза:

1. осаждение
2. нанесение
3. цеолиты
4. на основе углерода
5. сплавы металлов
6. термическое разложение
7. механическое смешение

Наиболее распространенные:

- а) включающее стадии гелеобразования и осаждения;
- б) основанные на нанесении активного компонента на носитель;
- в) основанные на смешении исходных веществ.

Существует альтернативная структура научных основ приготовления катализаторов. Основа этой структуры – обеспечение максимальной эффективности использования катализатора в промышленном реакторе. В идеале «проект» будущего катализатора включает предполагаемый оптимальный состав активных компонентов, их дисперсность, пространственное размещение и другие текстурные характеристики. На этапе оптимизации реактора проводится обоснованный выбор катализатора в виде

гранул, насадок или блоков, определяется их размер, требования к текстуре по обеспечению механических свойств, тепло- и массообмена и т.д.

Для приготовления катализатора с конкретными характеристиками, необходимо учитывать три блока, называемых «научные основы»:

- а) научные основы формирования химического и физического состава катализатора;
- б) научные основы формирования текстуры катализатора;
- в) методы корректного контроля и исследования структуры и текстуры.

Получение катализаторов методом осаждения

При использовании метода осаждения для получения катализаторов увеличивая рН среды добавлением к раствору соли осадителя, первой стадией процесса обычно является образование гидроксида, содержащего основные или кислые соли. Продукты гидролиза подвергаются быстрой полимеризации и конденсации с образование относительно устойчивых полимолекул, которые можно рассматривать как первичные элементы осадка.

По способности к кристаллизации гидроксиды можно разбить на три группы.

- к первой группе относятся аморфные, практически некристаллизующиеся гидроксиды, типичным представителем которых является силикагель.

- гидроксиды магния, кадмия и двухвалентного олова, образующие вторую группу, кристаллизуются настолько быстро, что аморфную фазу удастся наблюдать лишь в особых условиях.

- в третью группу входят гидроксиды титана, циркония, железа, меди и алюминия, а также гидратированные оксиды пентавалентной сурьмы и четырехвалентного олова.

Процесс укрупнения на примере формирования структуры силикагеля показан на рисунке. Первичные частицы золя размером около 4 нм обычно защищены ионно-сольватной оболочкой, препятствующей их слиянию в более крупные. Для образования концентрированного и стабильного золя достаточно наличия 1-4 ионов натрия на $1,0 \text{ нм}^2$ поверхности первичных глобул. Защитное действие ионно-сольватной оболочки продолжается до конечной стадии сушки геля, когда в результате испарения воды под действием капиллярных сил происходит принудительное сближение глобул. Следует отметить двойственное влияние ионов натрия на поверхность силикагеля. В начальной стадии он повышает защитное действие гидратной оболочки и предотвращает слияние первичных глобул, в условиях же сушки после разрушения гидратных оболочек повышает растворимость кремниевой кислоты и ускоряет рост размеров глобул в результате их слияния.

Методы осаждения позволяют в широких пределах варьировать пористую структуру и внутреннюю поверхность катализаторов и носителей. В технологическом отношении они обладают, однако, серьезными недостатками, заключающимися в значительном расходе реактивов, большом количестве сточных вод. Поэтому для катализаторов и носителей, производимых в количестве нескольких тонн в год, целесообразно искать другие пути диспергирования - термические, механические или путем осуществления химических превращений в твердой фаз. Примером последнего может служить способ получения активного оксида алюминия.

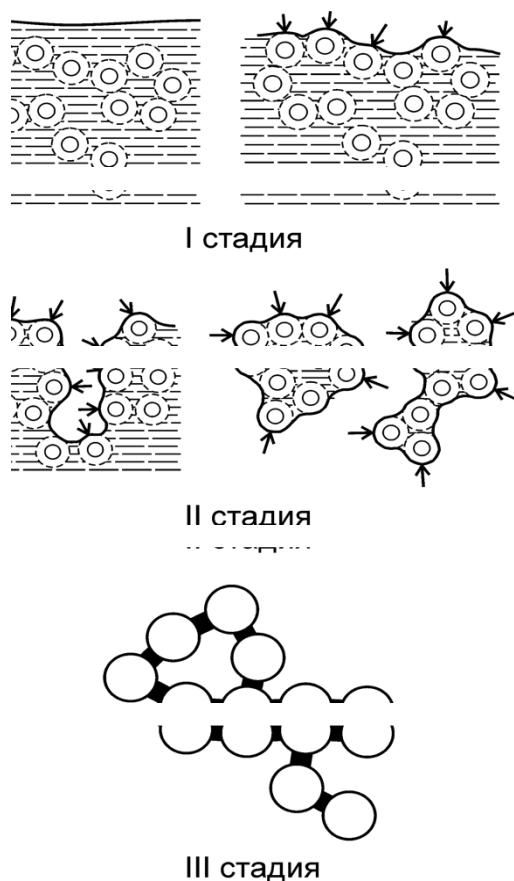


Схема формирования структуры силикагеля

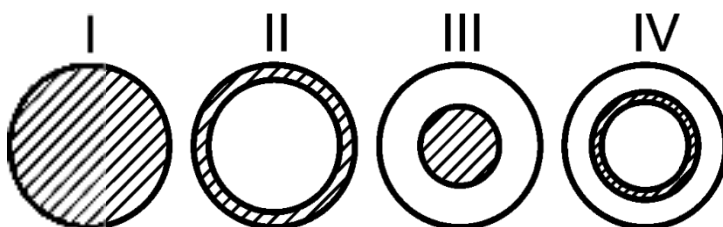
Получение катализаторов методом нанесения

Преимуществами методов приготовления катализаторов, основанных на нанесении активного компонента на носитель, являются эффективное использование активного компонента вследствие его высокой дисперсности, меньшее количество вредных отходов и др. В зависимости от механизма взаимодействия нанесенные катализаторы можно разделить на два больших класса, которые в дальнейшем будем называть "сорбционными" и "пропиточными".

В случае сорбционных катализаторов в процессе приготовления имеет место взаимодействие между носителем и исходным веществом,

адсорбирующимся на поверхности. В случае пропиточных катализаторов такое взаимодействие практически отсутствует и исходное соединение активного компонента находится в растворенном состоянии в порах носителя. При небольшом содержании активного компонента пористая структура нанесенного катализатора очень мало отличается от структуры носителя, поэтому для создания активных катализаторов очень важным является подбор носителя с оптимальной текстурой.

Характерным свойством нанесенных катализаторов является неравномерность распределения активного компонента по сечению гранулы. Рядом исследователей принято деление нанесенных катализаторов на четыре основных типа.



I - с равномерным распределением активного компонента;

II - "корочковый", у которых активный компонент сосредоточен у периферии гранул;

III - активный компонент сосредоточен в центре гранулы (так называемый "яичный желток");

IV - активный компонент расположен в средней области, удаленной как от центра, так и от внешней поверхности зерна катализатора.

Оптимальная глубина нанесения металла (например, платины) зависит в основном от значения критерия Ψ , определяющего соотношение между скоростью реакции и скоростью диффузии. При малых значениях $\Psi < 0,5$, когда реакция протекает в кинетической области, целесообразно наносить

платину равномерно по всей внутренней поверхности зерна (тип I). Эффект от увеличения концентрации платины в наружных слоях зерна начинает сказываться при $\Psi > 10$.

Приготовление так называемых корочковых катализаторов, содержащих активный компонент вблизи наружной поверхности зерна, целесообразно только в условиях высокой скорости реакции.

Для реакций, протекающих в кинетической области (малые значения Ψ), в ряде случаев целесообразно располагать активный компонент в центральной части зерна (тип III). При этом внешняя, лишенная активного компонента зона носителя может защищать активный компонент от ядов, кокса и т.д., снижать потери активного компонента при истирании катализатора.

Число вариантов распределения существенно увеличивается при переходе к катализаторам с бидисперсной структурой. Направленное чередование зон с разными активными компонентами может являться дополнительным резервом для управления селективностью реакций. Пример такого сложного многокомпонентного катализатора описан сотрудниками фирмы "Дженерал моторс", предложившими катализатор дожигания автомобильных выбросов, в котором у внешней поверхности размещена платина (II тип распределения), далее по глубине зерна последовательно размещены зоны, содержащие рутений и палладий (распределение IV типа), и, наконец, равномерно по зерну размещен церий (I тип распределения).

Метод нанесения используется и для получения катализаторов более сложного состава, активный компонент которых включает два или более элементов.

Несмотря на разнообразие химического состава, для нанесенных металлооксидных катализаторов можно выделить основные особенности, обусловленные методом нанесения активного компонента: для сорбционного способа характерны высокая, близкая к атомарным, дисперсность частиц

активного компонента, сохраняющаяся в широком диапазоне его содержания, и повышенная термостойкость в случае биэлементных катализаторов.

Катализаторы, полученные способом пропитки, высокодисперсны только при малом содержании активного компонента. К достоинствам пропиточного метода следует отнести его простоту и доступность исходных веществ, в основном нитратов и карбонатов. Однако следует указать и ряд недостатков: ограничения по концентрации активного компонента, обусловленные растворимостью исходного вещества и объемом пор носителя; возможность неравномерного распределения активного компонента по сечению гранулы вследствие выноса в процессе сушки части раствора на периферию зерна и т.д.

От указанных недостатков свободны сорбционные методы благодаря образованию химической связи между адсорбируемым веществом и функциональными группами носителя. Ограничения метода связаны прежде всего с недостаточным ассортиментом соединений, обладающих необходимой растворимостью и способных осаждаться на поверхности носителей.

Вопросы для практических занятий.

1. Каково значение катализа в нефте- и газопереработке?
2. Дайте определение катализатора, кто ввел это понятие?
3. Назовите основные характеристики катализаторов, дайте их краткое определение.
4. Дайте определение гомо- и гетерогенного катализа. Приведите примеры процессов или реакций.
5. Что такое отрицательный катализ, приведите примеры.
6. Какие классификации каталитических процессов вы знаете?
7. Опишите существующие теории катализа.

8. Какие критерии используют для классификации пористых веществ?
9. Как отличаются твердые тела по удельной поверхности?
10. От чего зависит скорость гетерогенно-каталитических реакций?
11. Какова роль катализатора в химической реакции?
12. Назовите характерные черты гетерогенно-каталитических процессов.
13. Дайте краткое описание геометрических теорий, приведите примеры.
14. В чем заключается принцип энергетического и геометрического соответствия в катализе?
15. Что является носителем каталитической активности согласно теории активных ансамблей?
16. На чем основаны представления о катализе согласно электронным теориям?
17. Как влияет катализатор на энергию активации и скорость реакции?
18. Что такое активные центры катализатора, кто ввел определение активных центров?
19. Как происходит адсорбция и хемосорбция в гетерогенном катализе и каковы методы их исследования?
20. Чем характеризуют адсорбцию, какие изотермы адсорбции Вы знаете?
21. Назовите экспериментальные методы определения адсорбции. Какой метод получил большее распространение?
22. Каковы стадии гетерогенного катализа?
23. Какие виды диффузии различают в гетерогенном катализе и чем они характеризуются?
24. Какие виды внешней диффузии Вы знаете и чем они характеризуются?

25. Какие виды внутренней диффузии Вы знаете и чем они характеризуются?
26. Какие кинетические закономерности характерны для реакций углеводородов на пористом катализаторе?
27. От чего зависит градиент температуры внутри гранул катализатора?
28. На чем основаны формальные кинетические модели каталитических реакций, каковы наиболее распространенные модели?
29. На чем основаны условные кинетические модели промышленных реакций, как их составляют, определяют скорость процесса?
30. Дайте характеристики кислотного катализа и активных кислотных центров.
31. Что характеризует функция Гаммета и чем она определяется?
32. Какая корреляция существует между кислотностью и каталитической активностью?
33. Как образуются карбокатионы, каковы их свойства?
34. Как осуществляется катализ на металлах и полупроводниках?
35. От чего зависит активность металланесенных катализаторов?
36. Что Вы знаете о дисперсности металланесенных катализаторов?
37. Опишите типы реакций, катализируемых металланесенными катализаторами.
38. Как происходит и от чего зависит спекание металланесенных катализаторов?
39. В чем заключается теория валентной связи?
40. В чем заключается теория зонных моделей металлов и полупроводников?
41. Какие катализаторы являются оксидными, каков механизм их действия, какие типы реакций катализируют?
42. Что Вы знаете о теоретических основах подбора катализатора?

43. Дайте характеристики активного комплекса, его функции в катализе.
44. Дайте характеристики носителя, его функции в катализе.
45. Дайте характеристики промоторов катализаторов, их функции в катализе.
46. По каким причинам происходит дезактивация катализатора?
47. Охарактеризуйте причины физической дезактивации катализаторов.
48. Охарактеризуйте причины химической дезактивации катализаторов.
49. Как происходит дезактивация катализатора при закоксовывании?
50. Как проявляется каталитическая активность самого кокса □
51. Как осуществляется регенерация катализаторов?
52. Назовите основные характеристики твёрдых катализаторов и методы определения физико-механических характеристик.
53. Назовите основные характеристики твёрдых катализаторов и методы определения физико-химических характеристик.
54. Назовите основные характеристики твёрдых катализаторов и методы определения технологических характеристик.
55. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику активной окиси алюминия.
56. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику активных углей.
57. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику аморфных алюмосиликатов.
58. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику кремнезёмов.
59. Что представляют собой цеолиты? Каковы их ионообменные свойства, термостабильность, кислотность?
60. Что представляет собой цеолитсодержащие катализаторы. в каких процессах используются?

61. Какова природа каталитически активных центров цеолитов, какие реакции ими катализируются?
62. Дайте характеристику оксидных катализаторов, природы их действия.
63. Как происходит активация, дезактивация и регенерация катализаторов гидроочистки.
64. Что представляют собой бифункциональные катализаторы, какова природа их действия?
65. Что является активным компонентом, носителем и промотором бифункциональных катализаторов?
66. Что является ядами для бифункциональных катализаторов?
67. Дайте классификацию каталитических реакций и катализаторов, приведите примеры.
68. Дайте краткую характеристику свойств катализаторов риформинга, изомеризации и гидрокрекинга.
69. Каковы основы синтеза и технологии производства аморфных алюмосиликатов?
70. Как формируют шариковые синтетические алюмосиликаты, назовите их основные характеристики?
71. Каковы основы синтеза и технологии производства цеолитов?
72. Каковы основы технологии получения цеолитсодержащих кислотных катализаторов?
73. Каковы основы технологии получения активной окиси алюминия, характеристики сырья и готовой продукции?
74. Каковы основы технологии получения оксидных катализаторов на основе активной окиси алюминия?
75. Как происходит формирование гранул различной формы?
76. Каковы основы технологии получения бифункциональных металланесенных катализаторов?

77. Назовите основные методы модифицирования цеолитов и цеолитсодержащих катализаторов.
78. Дайте краткое описание основной аппаратуры, применяемой при производстве.
79. Каковы проблемы экологии в производстве катализаторов, как утилизируют отходы производства?
80. Создание замкнутых циклов и безотходных технологий в производстве катализаторов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. – Уфа: «Гилем», 2002. – 671 с.
2. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа / С.А. Ахметов, М.Х. Ишмияров, А.П. Веревкин и др. – М.: Химия, 2005.
– 736 с.
3. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа / С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев и др. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.
4. Капустин В.М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. В 2 ч. Часть вторая. Деструктивные процессы. – М.: КолосС, 2007. – 334 с.
5. Переверзев А.Н. Технология нефти и газа. Уч. пособие. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2005. - 143 с.

Дополнительная литература:

1. Справочник нефтепереработчика / Под редакцией Г.А. Ластовкина, Е.Д.

Радченко, М.Г. Рудина. - Л.: Химия, 1986.- 648 с.

2. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А.И. Скобло, Ю.К. Молоканов, А.И. Владимиров, В.А. Щелкунов. - М.: Недра, 2000.- 677 с.

3. Каминский Э.Ф., Хавкин В.А. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты. - М.: изд-во "Техника", 2001.- 384 с.

4. Эрих В.Н., Расина М.Г., Рудин М.Г. Химия и технология нефти и газа. - Л.: Химия, 1985. – 408 с.

5. Магарил Р.З. Теоретические основы химических процессов переработки нефти. – Л.: Химия, 1985. – 280 с.

6. Капустин В.М., Кукес С.Г., Бертолусини Р.Г. Нефтеперерабатывающая промышленность США и бывшего СССР. - М.: Химия, 1995. – 304 с.

7. Радченко Е.Д., Нефедов Б.К., Алиев Р.Р. Промышленные катализаторы гидрогенизационных процессов нефтепереработки. - М.: Химия, 1987.- 224 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И
ПРОВЕДЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ
по дисциплине «Основы гетерогенного катализа и производство
катализаторов»**

Направление подготовки	18.03.01 Химическая технология
Направленность (профиль)	Технология неорганических веществ и минеральных удобрений
Форма обучения	Очная
Год начала обучения	2026
Реализуется	3 семестре

**Ставрополь
2026 г.**

Цель самостоятельной работы студентов:

1. Систематизировать современные процессы интеграции Российского высшего образования в общеевропейскую и мировую образовательную практику; раскрыть сущность проблем организации учебно-воспитательного процесса на современном этапе развития высшего образования.
2. Подобрать такой дидактический материал для самостоятельной работы, который бы позволил применить полученные знания на практике и развивать инициативу, активность и творческие способности.
3. Помочь студентам в формировании у них компетенций, согласно учебного плана.

Основными **формами работы и контроля** студентов являются:

Индивидуальное решение заданий, позволяющих оценивать и диагностировать уровень обученности, уровень умений и навыков по дисциплине.

Собеседование - форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя со студентом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, рассчитанная на выяснение объема знаний студента по определенному разделу, теме, проблеме и т. п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающая всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

Реферат – раскрытие сущности исследуемой проблемы, включающее обращение к различным точкам зрения на вопрос, а также изложение собственных взглядов на нее.

Индивидуальное решение заданий, позволяющих оценивать и диагностировать уровень обученности, уровень умений и навыков аспирантов по дисциплине

Для подготовки к выполнению задания следует изучить и проанализировать рекомендованную литературу и на их основании подготовиться к изложению темы.

При проверке задания оцениваются

- уверенное владение материалом;
- умение четко и логично излагать свои мысли;
- умение творчески подходить к решению основных проблем темы;
- самостоятельность мышления, умение отстаивать свою позицию в ходе последующих дискуссий,
- самостоятельная и выразительная устная речь, полностью раскрывающая суть проблематики задания.

Собеседование - форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающая всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

Принципиальные отличия заданий базового уровня от повышенного заключаются в большем объеме фактов и событий, в сравнительно-аналитическом характере изложения материала, его теоретической (методологической) составляющей.

Для подготовки к каждой теме следует изучить и законспектировать рекомендованные источники и научную литературу и на их основании

подготовиться к указанным в методических материалах вопросам для обсуждения.

При проверке задания, оцениваются:

- активное участие в работе;
- уверенное владение материалом;
- умение четко и логично излагать свои мысли;
- умение творчески подходить к решению основных вопросов темы;
- самостоятельность мышления,
- полное соответствие конспекта установленным требованиям;
- самостоятельная устная речь, полностью раскрывающая суть проблематики собеседования.

проблематики собеседования.

Реферат – раскрытие сущности исследуемой проблемы, включающее обращение к различным точкам зрения на вопрос, а также изложение собственных взглядов на нее.

Структура и содержание реферата

Структура реферата включает в себя следующие элементы:

- титульный лист;
- оглавление;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список литературы и источников;
- приложение.

Титульный лист – это информация о выходных данных вашей работы. Он является первой страницей научной работы и заполняется по строго определенным правилам. Титульный лист не нумеруется.

В *оглавлении* текста последовательно излагаются названия пунктов реферата с указанием страницы, с которой начинается каждый пункт. Заголовки оглавления должны точно повторять заголовки в тексте. Сокращать или давать их в другой формулировке, последовательности и соподчиненности по сравнению с заголовками в тексте нельзя. Заголовки одинаковых ступеней рубрикации необходимо располагать друг под другом. Заголовки каждой последующей ступени смещают на три–пять знаков вправо по отношению к заголовкам предыдущей ступени. Все заголовки начинают с прописной буквы без точки на конце. Последнее слово каждого заголовка соединяют отточием с соответствующим ему номером страницы в правом столбце оглавления.

Введение к работе. Здесь обычно обосновываются актуальность выбранной темы, цель и содержание поставленных задач, формулируются объект и предмет исследования, указывается избранный метод (или методы) исследования.

Содержание глав основной части должно точно соответствовать теме реферата и полностью её раскрывать. Эти главы должны показать умение автора сжато, логично и аргументировано излагать материал. Важно понимать, что каждая глава должна представлять собой законченное произведение. Её следует начинать постановкой рассматриваемой задачи, а завершать четкими, аргументированными выводами. Все приводимые в работе данные обязательно следует сопровождать подстрочной ссылкой на источник, описание которого должно приводиться в соответствии с требованиями библиографических стандартов. Как правило, основная часть реферата состоит из 2–3 глав, которые в случае необходимости разбиваются на параграфы.

Реферат заканчивается заключительной частью, которая так и называется «*заключение*». Этот синтез – последовательное, логически

стройное изложение полученных итогов и их соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными и сформулированными во введении.

После заключения помещается *библиографический список использованной литературы*, куда включаются оригинальные тексты, монографические исследования, научные статьи, учебные пособия и др. Каждый включенный в такой список литературный источник должен иметь отражение в тексте реферата. Если автор реферата делает ссылку на какие-либо заимствованные факты или цитирует работы других авторов, то он должен обязательно указать в подстрочной ссылке, откуда взяты приведенные материалы. Список литературы должен включать не менее 10 источников.

Объем реферата должен составлять не менее 24 страниц машинописного текста. Объем приложений не ограничивается.

Общие требования к оформлению реферата

Текст реферата должен быть напечатан на одной стороне стандартного листа белой односторонней бумаги формата А4 (210×297 мм) через полтора интервала (размер шрифта – 14) с применением черных чернил с полями вокруг текста. Размер левого поля 30 мм, правого – 10 мм, верхнего – 20 мм, нижнего – 20 мм. При таких полях каждая страница должна содержать приблизительно 1800 знаков (30 строк, по 60 знаков в строке, считая каждый знак препинания и пробел между словами также за печатный знак).

Текст перепечатывается в строго последовательном порядке. Не допускаются разного рода текстовые вставки и дополнения, помещаемые на отдельных страницах или на оборотной стороне листа, и переносы кусков текста в другие места. Все сноски и подстрочные примечания перепечатываются (через один интервал) на той странице, к которой они относятся. Все страницы нумеруются, начиная с титульного листа. Цифру, обозначающую порядковый номер страницы, ставят в правом углу верхнего

поля листа (на первой и второй странице цифру, обозначающую порядковый номер, не ставят).

Приложение для рефератов являются желательным, но необязательным элементом. В приложение обычно входят различные таблицы, графики, схемы, рисунки и т.п. Приложения помещают после списка использованных библиографических источников в порядке их упоминания в тексте. Каждое приложение следует начинать с нового листа. Приложение не входит в параметры минимального объема работы

Критерии оценки самостоятельной работы студентов

Критерии оценивания результатов самостоятельной работы студентов разработаны с учетом требований ФГОС ВО. Задания, выносимые на самостоятельную работу, оцениваются по шкале «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов; исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно излагает материал; свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний; использует в ответе дополнительный материал все предусмотренные программой задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному; анализирует полученные результаты; проявляет самостоятельность при выполнении заданий.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено полностью, необходимые практические компетенции в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения достаточно высокое. Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, большинство предусмотренных программой заданий выполнено, но в них имеются ошибки, при ответе на поставленный вопрос студент допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, наблюдаются нарушения логической последовательности в изложении программного материала.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы, необходимые практические компетенции не сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнено, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному.

Вопросы для собеседования

1. Каково значение катализа в нефте- и газопереработке?
2. Дайте определение катализатора, кто ввел это понятие?
3. Назовите основные характеристики катализаторов, дайте их краткое определение.
4. Дайте определение гомо- и гетерогенного катализа. Приведите примеры процессов или реакций.
5. Что такое отрицательный катализ, приведите примеры.
6. Какие классификации каталитических процессов вы знаете?
7. Опишите существующие теории катализа.
8. Какие критерии используют для классификации пористых веществ?
9. Как отличаются твердые тела по удельной поверхности?

10. От чего зависит скорость гетерогенно-каталитических реакций?
11. Какова роль катализатора в химической реакции?
12. Назовите характерные черты гетерогенно-каталитических процессов.
13. Дайте краткое описание геометрических теорий, приведите примеры.
14. В чем заключается принцип энергетического и геометрического соответствия в катализе?
15. Что является носителем каталитической активности согласно теории активных ансамблей?
16. На чем основаны представления о катализе согласно электронным теориям?
17. Как влияет катализатор на энергию активации и скорость реакции?
18. Что такое активные центры катализатора, кто ввел определение активных центров?
19. Как происходит адсорбция и хемосорбция в гетерогенном катализе и каковы методы их исследования?
20. Чем характеризуют адсорбцию, какие изотермы адсорбции Вы знаете?
21. Назовите экспериментальные методы определения адсорбции. Какой метод получил большее распространение?
22. Каковы стадии гетерогенного катализа?
23. Какие виды диффузии различают в гетерогенном катализе и чем они характеризуются?
24. Какие виды внешней диффузии Вы знаете и чем они характеризуются?
25. Какие виды внутренней диффузии Вы знаете и чем они характеризуются?

26. Какие кинетические закономерности характерны для реакций углеводородов на пористом катализаторе?
27. От чего зависит градиент температуры внутри гранул катализатора?
28. На чем основаны формальные кинетические модели каталитических реакций, каковы наиболее распространенные модели?
29. На чем основаны условные кинетические модели промышленных реакций, как их составляют, определяют скорость процесса?
30. Дайте характеристики кислотного катализа и активных кислотных центров.
31. Что характеризует функция Гаммета и чем она определяется?
32. Какая корреляция существует между кислотностью и каталитической активностью?
33. Как образуются карбокатионы, каковы их свойства?
34. Как осуществляется катализ на металлах и полупроводниках?
35. От чего зависит активность металланесенных катализаторов?
36. Что Вы знаете о дисперсности металланесенных катализаторов?
37. Опишите типы реакций, катализируемых металланесенными катализаторами. 38. Как происходит и от чего зависит спекание металланесенных катализаторов?
39. В чем заключается теория валентной связи?
40. В чем заключается теория зонных моделей металлов и полупроводников?
41. Какие катализаторы являются оксидными, каков механизм их действия, какие типы реакций катализируют?
42. Что Вы знаете о теоретических основах подбора катализатора?
43. Дайте характеристики активного комплекса, его функции в катализе.

44. Дайте характеристики носителя, его функции в катализе.
45. Дайте характеристики промоторов катализаторов, их функции в катализе.
46. По каким причинам происходит дезактивация катализатора?
47. Охарактеризуйте причины физической дезактивации катализаторов.
48. Охарактеризуйте причины химической дезактивации катализаторов.
49. Как происходит дезактивация катализатора при закоксовывании?
50. Как проявляется каталитическая активность самого кокса□
51. Как осуществляется регенерация катализаторов?
52. Назовите основные характеристики твёрдых катализаторов и методы определения физико-механических характеристик.
53. Назовите основные характеристики твёрдых катализаторов и методы определения физико-химических характеристик.
54. Назовите основные характеристики твёрдых катализаторов и методы определения технологических характеристик.
55. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику активной окиси алюминия.
56. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику активных углей.
57. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику аморфных алюмосиликатов.
58. Перечислите основные носители катализаторов, адсорбенты и хемосорбенты, дайте характеристику кремнеземов.
59. Что представляют собой цеолиты? Каковы их ионообменные свойства, термостабильность, кислотность?
60. Что представляет собой цеолитсодержащие катализаторы. в каких процессах используются?
61. Какова природа каталитически активных центров цеолитов, какие реакции ими катализируются?

62. Дайте характеристику оксидных катализаторов, природы их действия.
63. Как происходит активация, дезактивация и регенерация катализаторов гидроочистки.
64. Что представляют собой бифункциональные катализаторы, какова природа их действия?
65. Что является активным компонентом, носителем и промотором бифункциональных катализаторов?
66. Что является ядами для бифункциональных катализаторов?
67. Дайте классификацию каталитических реакций и катализаторов, приведите примеры.
68. Дайте краткую характеристику свойств катализаторов риформинга, изомеризации и гидрокрекинга.
69. Каковы основы синтеза и технологии производства аморфных алюмосиликатов?
70. Как формируют шариковые синтетические алюмосиликаты, назовите их основные характеристики?
71. Каковы основы синтеза и технологии производства цеолитов?
72. Каковы основы технологии получения цеолитсодержащих кислотных катализаторов?
73. Каковы основы технологии получения активной окиси алюминия, характеристики сырья и готовой продукции?
74. Каковы основы технологии получения оксидных катализаторов на основе активной окиси алюминия?
75. Как происходит формирование гранул различной формы?
76. Каковы основы технологии получения бифункциональных металланесенных катализаторов?
77. Назовите основные методы модифицирования цеолитов и цеолитсодержащих

катализаторов.

78. Дайте краткое описание основной аппаратуры, применяемой при производстве.

79. Каковы проблемы экологии в производстве катализаторов, как утилизируют отходы производства?

80. Создание замкнутых циклов и безотходных технологий в производстве катализаторов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

3. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. – Уфа: «Гилем», 2002. – 671 с.

4. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа / С.А. Ахметов, М.Х. Ишмияров, А.П. Вережкин и др. – М.: Химия, 2005.

– 736 с.

6. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа / С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев и др. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.

7. Капустин В.М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. В 2 ч. Часть вторая. Деструктивные процессы. – М.: КолосС, 2007. – 334 с.

8. Переверзев А.Н. Технология нефти и газа. Уч. пособие. – Ставрополь:

СевКавГТУ, 2005. - 143 с.

Дополнительная литература:

8. Справочник нефтепереработчика / Под редакцией Г.А. Ластовкина, Е.Д.

Радченко, М.Г. Рудина. - Л.: Химия, 1986.- 648 с.

9. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А.И. Скобло, Ю.К. Молоканов, А.И. Владимиров, В.А. Щелкунов. - М.: Недра, 2000.- 677 с.
10. Каминский Э.Ф., Хавкин В.А. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты. - М.: изд-во "Техника", 2001.- 384 с.
11. Эрех В.Н., Расина М.Г., Рудин М.Г. Химия и технология нефти и газа. - Л.: Химия, 1985. – 408 с.
12. Магарил Р.З. Теоретические основы химических процессов переработки нефти. – Л.: Химия, 1985. – 280 с.
13. Капустин В.М., Кукес С.Г., Бертолусини Р.Г. Нефтеперерабатывающая промышленность США и бывшего СССР. - М.: Химия, 1995. – 304 с.
14. Радченко Е.Д., Нефедов Б.К., Алиев Р.Р. Промышленные катализаторы гидрогенизационных процессов нефтепереработки. - М.: Химия, 1987.- 224 с.