**Промышленный катализ. Виды катализа. Контактные массы. Пути интенсификации каталитических процессов**

Каталитические процессы в настоящее время составляют основу химической технологии. Причемобласть их применения расширяется: около90 % новых производств, освоенных за последние годы химической промышленностью, основаны на взаимодействии, протекающем в присутствии катализаторов.

***Нефтепереработка и нефтехимия****.* В настоящее время более 80% нефти перерабатывают с использованием каталитических процессов. На применении катализаторов основаны многие методы переработки нефтепродуктов: каталитический крекинг, риформинг, изомеризация, ароматизация, алкилирование углеводородов. Из твёрдого и газообразного топлива при помощи катализаторов можно получать жидкие моторные топлива.

***Органический синтез.*** Без катализаторов невозможно осуществление большинства процессов органического синтеза – процессов окисления, гидрирования, дегидрирования, гидратации, дегидратации и др.

При помощи катализаторов получают исходные вещества для основного и тонкого органического синтеза, мономеры для синтеза высокомолекулярных веществ. Например, каталитические процессы применяются в производстве метанола, этанола, формальдегида, ацетальдегида, уксусной кислоты и других органических продуктов.

***Получение важнейших неорганических продуктов***. Катализ применяется в производстве серной кислоты, водорода, аммиака, азотной кислоты.

***Фармацевтическая промышленность.*** Без катализаторов не обходится получение многих лекарств, витаминов, биологически активных веществ и т.п.

***Пищевая промышленность.*** Каталитическое гидрирование жидких растительных масел является основой производства маргарина.

***Водородная энергетика.*** В последние годы катализаторы стали применять для решения энергетических задач. Весьма перспективным является создание топливных элементов для экономичного преобразования энергии топлива в электрическую энергию.

***Природоохранная деятельность.*** Основным направлением в экологическом катализе является очистка выбросов промышленных производств и выхлопных газов автомобилей от вредных веществ.

Наиболее актуальными проблемами являются удаление оксидов серы и азота из отходящих газов промышленных предприятий, каталитическая очистка отходящих газов дизельных двигателей от сажи, разработка катализаторов окисления летучих органических соединений.

Первостепенное внимание уделяется созданию каталитических процессов очистки сточных вод и питьевой воды от загрязнений, в частности, удалению из воды нитратов.

**Катализом** называется **изменение скорости химических реакций в результате воздействия веществ - катализаторов, которые участвуют в реакции, вступая в промежуточное химическое взаимодействие с реагентами, но восстанавливают свой химический состав по окончании химического акта.**

Основное значение катализа заключается в том, что катализаторы делают возможными многие химические реакции, позволяют осуществлять их с меньшими энергетическими затратами, при более низких температурах и давлениях.

Подбирая соответствующим образом катализаторы, можно осуществить процессы в желаемом направлении и с нужной скоростью.

Под ***катализом*** понимают изменение скорости химических реакций под воздействием веществ – катализаторов, которые, участвуя в процессе, остаются после его окончания химически неизменными. Катализ называется положительным, если катализатор ускоряет реакции, и отрицательным, если скоростьреакции под воздействием катализатора снижается.

Применение катализаторов облегчает практическое осуществление многих химических реакций; скорость некоторых из них увеличивается в тысячи и даже миллионы раз. Очень многие промышленныепроцессы удалось осуществить только благодаря применению катализаторов.

Отрицательный катализ применяется значительно реже: катализаторы замедляющие скорость процесса называют также *ингибиторами.*

***Катализаторами могут быть*** различные вещества: газы, жидкости и твердые тела. По принципу фазового состояния реагентов и катализатора каталитические процессы разделяют на две основные группы: гомогенные и гетерогенные. В особую группу следует выделить микрогетерогенные, в частности, ферментативные каталитические процессы.

К твердым катализаторам можно отнести металлы и их оксиды, например, железоFe при синтезе аммиака, платинуPt при окислении аммиака, оксид ванадияV2O5 при окисленииSO2, Al2O3 при крекинге нефтепродуктов и др.

Жидкими катализаторами служат обычно кислоты и основания, например, серная кислотаH2SO4 ифосфорная кислота Н3РО4 применяются при алкилировании ароматических углеводородов, при изомеризации*н*-бутилена в изобутилен и др.

Примером газообразных катализаторов может служитьBF3 в процессах полимеризации некоторыхуглеводородов.

Каталитические процессы можно разделить на две группы: гомогенные и гетерогенные. В гомогенно-каталитических реакциях реагирующие вещества и катализатор составляют одну фазу, а в гетерогенно-каталитических реакциях– разные фазы. В особую группу выделены микрогетерогенные и ферментативные каталитические процессы. *Микрогетерогенный катализ* происходит в жидкой фазе с участием коллоидных частиц металлов в качестве катализаторов. *Ферментативный катализ* наблюдается вбиологических системах с участием сложных комплексов(белковой природы), называемых ферментами. В некоторых реакциях катализатором является продукт. Скорость таких реакций со временем не уменьшается, а увеличивается, т.к. растёт количество продукта. Такие реакции называют *автокаталитическими.*

***Общие закономерности каталитических реакций.***

Каталитические реакции подчиняются общим законам химии и термодинамики, но имеют при этомсвои особенности, так как в них всегда участвует один дополнительный компонент – катализатор. Действие катализаторов принципиально отличается от действия других факторов, способствующих интенсификации химических реакций, например, температуры, давления, радиационного воздействия и др. Повышение температуры может ускорять реакцию вследствие увеличения энергетического уровня реагирующихмолекул, т.е. их активации за счет вводимого извне тепла. При этом изменяется внутренняя энергия системы и смещается положение равновесия.

Катализатор же не влияет ни на равновесие химической реакции, ни на все другие термодинамические характеристики реакций. Изменяя в равной степени скорость прямой и обратной реакций, катализатор способствует повышению скорости достижения равновесия при данных условиях.

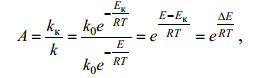
Существует несколько теорий, объясняющих механизм действия катализаторов, из которых наиболее распространенной теорией, служащей основой современных представлений о катализе, является теория промежуточных соединений. Согласно этой теории, медленную реакцию между исходными веществами можно заменить двумя или несколькими болеебыстрыми реакциями с участием катализатора, который образует с исходными веществами промежуточные непрочные соединения. Ускоряющее действие катализатора состоит в понижении энергии активации реакций образующихся промежуточных соединений, что оказывает очень сильное влияние наскорость реакции, поскольку в уравнение Аррениуса:



энергия активации входит в показатель степени.

При практическом применении большое значение имеет технологическая характеристика промышленных катализаторов(активность, температура зажигания, производительность, селективность, отравляемость, прочность и др.).

Наиболее важной характеристикой катализаторов является их ***активность,*** т.е. мера ускоряющегодействия катализатора по отношению к данной реакции. Активность определяется уравнением:



где А– активность катализатора; k, kк – константы скорости реакции без катализатора и в присутствиикатализатора; ∆E – снижение энергии активации под действием катализатора

∆E = Е – Ек

где: E, Ек - энергия активации реакции без катализатора и в присутствии катализатора.

*Температурой зажигания катализатора* называют минимальную температуру реагирующей смеси, при которой процесс начинает протекать с достаточной для практических целей скоростью. Чем активнее катализатор, тем ниже температура зажигания, что особенно важно при проведении экзотермических обратимых реакций, так как при этом соответственно повышается степень превращения. Для реакции А → R + Q указанное положение отражено на рисунке 1.

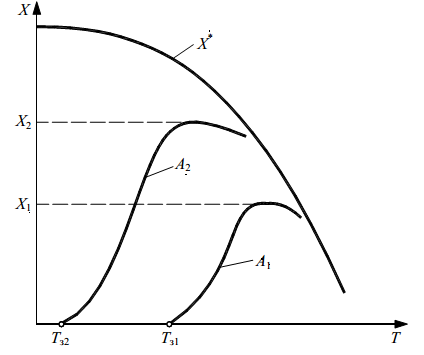


Рисунок 1 - Зависимость степени превращения X

экзотермической обратимой реакции от температуры Т

для катализаторов различной активности при

А1< А2

А = 1/Т

При работе на катализаторе А1 с температурой зажиганияTз1 (кривая 1) максимальная степень превращения составляетX1. При работе на более активном катализатореA2 с более низкой температуройзажиганияTз2 (кривая 2) максимальная степень превращения более высокая и соответственно будетравна X2.

При понижении температуры зажигания облегчается оформление каталитического процесса, таккак расширяется рабочий интервал температур(междуTз и максимальной температурой), упрощаетсяконструкция реактора, уменьшается предварительный подогрев реагентов и становится устойчивее технологический режим.

*Отравление катализатора*– это частичная или полная потеря его активности в результате действияпосторонних примесей– контактных ядов. Отравление может быть обратимым и необратимым. При обратимом отравлении примеси снижают активность катализатора временно, пока они присутствуют взоне катализа; после удаления ядов катализатор восстанавливает свою прежнюю активность. При необратимом отравлении активность катализатора не восстанавливается и после удаления контактных ядовиз зоны реакции.

Активность твердого катализатора может снижаться также вследствие уменьшения активной поверхности катализатора под воздействием, например, высоких температур, при осаждении на поверхности катализатора продуктов реакции или пыли, механического разрушения катализатора и по многимдругим причинам.

Важной особенностью катализаторов является их избирательность(селективность) по отношениюк определенным реакциям. В сложных реакциях(параллельных и последовательных), где термодинамически возможно образование нескольких продуктов, катализатор позволяет ускорить только одну целевую реакцию; естественно, что это имеет большое практическое значение.

Примером избирательности катализатора может служить реакция окисленияNH3 до NO на платиновом катализаторе:

4NH3+ 5О2 = 4NO + 6Н2О+ 986 кДж,

протекающая полностью за десятитысячные доли секунды, т.е. практически мгновенно. Одновременнос указанной реакцией протекают две параллельные реакции при которых образуютсяN2О иN2:

4NH3+ 4O2= 2N2O + 6H2O + 1105 кДж,

4NH3+ 3O2= 2N2+ 6H2O + 1269 кДж.

Эти реакции термодинамически более выгодны, поскольку они сопровождаются выделением большого количества тепла, однако практически они не протекают, поскольку в присутствии платиновогокатализатора их скорость неизмеримо мала.

Особенно сильно селективность проявляется в сложных органических реакциях. Так, например, этиловый спирт в зависимости от типа катализатора и условий проведения процесса катализа может превращаться в следующие продукты: этилен СН2–СН2, диэтиловый эфир СН3–СН2–О–СН2–СН3, ацетонСН3СОСН3, бутадиен СН2=СН–СН=СН2, ацетальдегид СН3СНО и другие продукты. Следовательно,применяя соответствующий катализатор, из одного и того же сырья можно получить различные целевыепродукты.

В присутствии катализатора обычно снижается порядок реакции, причем, чем активнее катализатор, тем этот эффект сказывается сильнее, т.е. тем ниже порядок реакции. В связи с этим, кинетика каталитических реакций обычно описывается уравнениями, найденными эмпирически, и формальный порядок таких каталитических реакций будет выражаться как в виде целого, так и дробного числа.

Влияние катализатора на порядок реакции можно проследить на примере реакции окисленияSO2:

2SO2+ O2­ = 2SO3+ Q,

скорость которой, без катализатора может быть выражена следующим уравнением:



где C SO3 , C SO2 , CО2 – текущие концентрации.

Таким образом порядок реакции п = 2 + 1 = 3.

При проведении этой реакции на ванадиевом катализаторе ее скорость выражается уравнением Борескова:

- rSO2 = dCSO3/dτ = k2[(CSO2 - C\*SO2)/CSO3]0,8·CO2

где C\* SO2 – равновесная концентрация SO2.

В этом случае п = 0,8 + 1 = 1,8.

В гомогенно-каталитических реакциях скорость процесса зависит от концентрации не только реагирующих веществ, но и катализатора.

Основным недостатком гомогенного катализа является трудность выделения катализатора из конечной продукционной смеси, в результате чего часть катализатора теряется, а целевой продукт загрязняется.

Однако в последнее время ведутся обширные исследования в области высокоактивных катализаторов гомогенного катализа, которые, присутствуя в малых дозах, вызывают цепные реакции. Поскольку количество вводимого катализатора невелико, после реакции он не извлекается из реакционной смеси, а остаетсяв целевом продукте, не снижая качества получаемого целевого продукта.

Большой интерес к гомогенному катализу объясняется главным образом тем, что при подборе соответствующих катализаторов интенсивность гомогенных процессов очень высока. Это объясняется тем, что гомогенные реакции протекают на микроуровне(на уровне отдельных молекул), когда вероятностьстолкновения молекул реагирующих веществ с молекулами катализатора весьма значительная.

***Гетерогенный катализ.***

Большинство известных промышленных каталитических реакций – это реакции между газообразными реагентами на твердых катализаторах. Изменение реакционного пути происходит в этом случаеблагодаря образованию промежуточных непрочных продуктов взаимодействия реагирующих веществ скатализатором.

В общем случае процесс гетерогенного катализа на твердых пористых катализаторах складываетсяиз нескольких элементарных стадий (рисунок 2), а именно:

1) внешняя диффузия реагирующих веществ из ядра потока к поверхности зерен катализатора (через пограничный слой газа);

2) внутренняя диффузия реагентов в порах зерна катализатора;

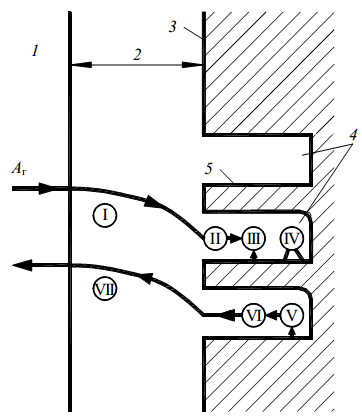
3) активированная адсорбция веществ на поверхности катализатора с образованием поверхностныхнепрочных химических соединений– активированных комплексов;

4) перегруппировка атомов с образованием поверхностных комплексов продукт– катализатор;

5) десорбция продукта с поверхности;

6) внутренняя диффузия продукта в порах зерна катализатора;

7) внешняя диффузия продукта реакции от поверхности зерна катализатора в ядро потока(черезпограничный слой газа).



1– турбулентный поток газа; 2– пограничный слой газа; 3– наружная поверхность катализатора; 4– поры катализатора; 5– внутренняя поверхность пор; I – внешняя диффузия; II – внутренняя диффузия; III – активированная адсорбция; IV – перегруппировка атомов на поверхности; V – десорбция продукта; VI – внутренняя диффузия продукта; VII – внешняя диффузия продукта

Рисунок 2 - Элементарные стадии гетерогенного катализа

В отличие от некаталитического гетерогенного процесса, протекающего в системе Г – Т, в данномслучае появляются дополнительные промежуточные стадии, в частности, активированная адсорбция молекул исходных веществ на поверхности катализатора(стадияIII). При этом желательно, чтобы твердыекатализаторы имели большую легко доступную поверхность, что достигается уменьшением размера зерени увеличением их пористости. В ряде случаев внутренняя поверхность таких катализаторов достигает десятков и даже сотен квадратных метров на1 см3катализатора.

При наличии пористого катализатора реакция протекает как на внешней, так и на внутренней поверхности гранул катализатора. Часто внутренняя поверхность в тысячи раз превышает внешнюю поверхность, в этом случае влияние последней на процесс невелико.

В настоящее время установлено, что не вся поверхность катализатора однородна, поэтому катализосуществляется только на так называемых активных центрах.

***Кинетика гетерогенно-каталитических реакций***.

В общем случае суммарное уравнение скорости всего процесса гетерогенного катализа должновключать описание каждой из его стадий. Но точно так же, как и при протекании гетерогенного некаталитического процесса, не все его стадии оказывают равное влияние на скорость катализа.

В большинстве случаев одна из стадий является наиболее медленной, лимитирующей процесс; она иопределяет его скорость, поэтому для изыскания путей интенсификации такого процесса важно преждевсего установить лимитирующую стадию.

Из анализа гетерогенных некаталитических процессов известно, что если наиболее медленной стадией, лимитирующей общую скорость, является диффузионный перенос газообразного вещества черезпограничный слой газа, т.е., если процесс протекает во внешнедиффузионной области, то эффективнымсредством его ускорения служит увеличение скорости газового потока. На этом основан наиболее частоприменяемый экспериментальный метод определения влияния диффузии на скорость каталитическогопроцесса.

Для этой цели проводят серию опытов по определению скоростикаталитической реакции при различной скорости потока реакционной смеси, но при постоянном отношении объема катализатора кобъему смесиVk/Vг = const или Vk/F∙ώ = const (гдеVk– объем катализатора; Vг - объем реакционной газовой смеси; f – площадь сечения контактной трубки; ω– линейная скорость газового потока).

При увеличении линейной скорости газового потока ω (что достигается уменьшением площади сечения f) скорость реакции будет возрастать только до тех пор, пока процесс проходит во внешнедиффузионной области.

Влияние внутренней диффузии исследуют путем проведения серии опытов при скорости потока ω в области, где внешняя диффузия уже не оказывает влияния на общую скорость процесса. Опытыпроводят на зернах катализатора различного размера. Результаты опытов выражают в виде графическойзависимости (рисунок 3).

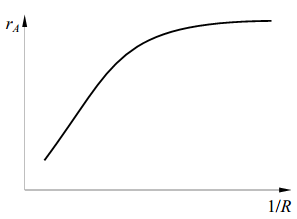


Рисунок 3 – Влияние внутренней диффузии (размера зерен катализатора R) на скорость каталитического процесса r.

Активное действие катализатора обусловлено прежде всего предварительной адсорбцией реагирующих веществ на поверхности зерен катализатора (стадии III–V на рисунке 2), что оказывает большое влияние на скорость гетерогенного катализа. Адсорбция является самопроизвольным процессом, поэтому она сопровождается убылью энергии системы и связана с выделением тепла.

Существует два вида адсорбции– физическая и химическая(последняя называется также активированной адсорбцией, или хемосорбцией). Процесс катализа связан с хемосорбцией, но хемосорбция может быть обратимой и необратимой. Естественно, что в процессе катализа хемосорбция должна быть обратимой, так как активныецентры должны непрерывно возобновлять свою функциональную деятельность по отношению к реагентам. Необратимая адсорбция вызывает отравление катализатора.

С целью установления функциональной зависимости скорости гетерогенного катализа от различных факторов проводят всесторонние исследования, что позволяет определить влияние различных показателей на скорость адсорбции и десорбции реагентов поверхностью катализатора, а также на скорость протекания других стадий, определяющих каталитический процесс в целом. Полученные приэтом данные используют для составления теоретических уравнений, позволяющих установить общиезакономерности в идеальных условиях.

Для практических целей обычно применяют эмпирические уравнения, которые получают путемтщательного изучения влияния различных факторов на скорость конкретного каталитического процессав условиях, близких к производственным. При этом идеализированные модели служат отправной точкой для наиболее эффективного анализа экспериментальных данных.

Нахождение кинетических уравнений и определение оптимальных параметров является главной целью научных исследований в области каталитических процессов, так как эти данные используются затем для расчета каталитических реакторов.

***Температура*** оказывает весьма существенное влияние на каталитические процессы, так как при повышении температуры увеличивается константа скорости реакциии одновременно изменяетсяконстанта равновесия. Для процессов, проходящих в кинетической области, повышение температуры всегда способствует приближению процесса к состоянию равновесия. Но, как известно, при обратимых реакциях равновесная степень превращения X\*при повышении Т уменьшается для экзотермических реакций и увеличивается для эндотермических реакций. Поэтому закономерности, отражающиесуммарную скорость реакции и действительную степень превращения для экзотермических и эндотермических реакций, совершенно различны. При этом наблюдается такая же функциональная зависимостьХ= f (Т), как и для некаталитических процессов.

***Время контакта***(время соприкосновения) реагирующих веществ с катализатором также являетсяважной технологической характеристикой каталитического процесса, так как оно определяет его интенсивность. При расчете реакторов время контакта определяют по уравнению: **τ = Vк / V,**

где τ– время контакта; Vк – объем катализатора; V – объем реакционной смеси, проходящей через катализатор в единицу времени.

Величина, обратная времени контакта, называется ***объемной скоростью*** и выражается уравнением: **S = 1/ τ,**где S– объемная скорость(объем реакционной смеси, проходящей через единицу объема катализатора вединицу времени), м3(газа)/м3(катализ)∙сек или сек-1.

При увеличении объемной скорости обычно снижается степень превращения, однако при этом возрастает интенсивность работы аппарата, т.е. увеличивается количество целевого продукта, получаемого с единицы объема катализатора в единицу времени. Это объясняется тем, что при увеличении скоростипотока реагирующая система в большей мере удалена от равновесия, процесс протекает в области высоких скоростей за счет большой движущей силы.

***Интенсивность катализатора*** выражают в виде уравнения: **G = ρ∙z∙S,**

где G – производительность катализатора, кг∙ч-1∙м-3, ρ – плотность реагента при нормальных условиях, кг∙м-3, z – мольная доля целевого продукта в газовой смеси, S – объемная скорость, ч-1.

Из уравнения видно, что при увеличении объемной скорости производительность катализаторавозрастает. Однако возможности для увеличения S ограничены, так как при этом степень превращенияХА уменьшается(снижается концентрация целевого продукта, что затрудняет выделение его из реакционной смеси), возрастает расход энергии и нарушается автотермичность экзотермической реакциивследствие относительного увеличения объема реакционной смеси.

***Контактные массы.***Промышленные твердые катализаторы обычно не являются индивидуальными веществами. Онипредставляют собой, за редким исключением, сложную смесь, называемую контактной массой. В контактной массе одни вещества являются собственно катализаторами, другие– носителями, а третьи служат активаторами (рисунок 4).



Рисунок 4 – Состав контактной массы

*Носители (трегеры)*– термостойкие, инертные, пористые вещества, на которые осаждением или другими способами наносят катализатор. Применение носителей улучшает свойства катализаторов и удешевляет их. В качестве носителей применяютпемзу, асбест, силикагель и другие пористые вещества. Каталитическая реакция протекает в основном на поверхности пор катализатора. Чем выше пористость катализатора и чем меньше диаметр пор, тем больше внутренняя поверхность, а, следовательно, тем больше скорость процесса.

*Активаторы или промоторы*– вещества, повышающие активность основного катализатора, например, окислы щелочных металлов увеличивают активность железных катализаторов в синтезе аммиака и ванадиевых катализаторов при окислении двуокиси серы.

Механизм действия активатора может быть самым различным: они могут образовывать химическиесоединения, твердые растворы, могут изменять электрофизические свойства поверхности и т.д. Активаторы могут также увеличивать активность катализатора, развивая и стабилизируя его поверхность. Последние называются структурными.

Примерами контактных масс являются ванадиевые катализаторы процесса контактирования сернистого газа взамен дорогих платиновых марок БАВ и СВД:

*БАВ (барий, алюминий, ванадий):*

++

*CВД (сульфованадат на диатомите)*

++

Контактные массы изготовляют в виде гранул разной формы, колец Рашига и Палля, сетчатых цилиндров и т.д.

Наиболее часто катализаторы изготавливают следующим образом:

1) осаждением гидроокисей или карбонатов(из растворов их солей) на носителе с последующимформованием и прокаливанием;

2) совместным прессованием всех компонентов катализатора с вяжущим веществом;

3) сплавлением нескольких веществ;

4) пропиткой пористого носителя раствором, содержащим катализатор и активатор.

Катализатор обычно готовят в виде зерен, таблеток, гранул. Иногда катализаторы применяют в видетончайших сеток, изготовленных из металлов или сплавов.

Качество катализаторов характеризуют следующими основными показателями:

• активностью;

• избирательностью действия;

• устойчивостью к ядам и термостойкостью;

• механической прочностью;

• доступностью и дешевизной;

• теплопроводностью, которая должна быть возможно более высокой.

***Реакторы для проведения гетерогенно-каталитических процессов***.

В настоящее время насчитываются десятки тысяч гетерогенно-каталитических процессов, осуществляемых в различных реакторах, которые часто называют контактными аппаратами, или конверторами (рисунок 5)

Контактные аппараты классифицируют:

– по способу контакта между катализатором и реагентами;

– по структуре потоков взаимодействующих веществ;

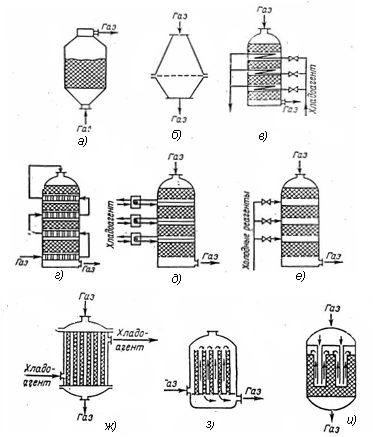
– по способу отвода тепла.

Наиболее часто контактные аппараты также классифицируют в зависимости от состояния катализатора:

– с неподвижным слоем катализатора;

– с движущимся слоем катализатора;

– с псевдоожиженным слоем катализатора.



а – с одним неподвижным слоем катализатора; б – с катализаторной сеткой; в – полочный аппарат с промежуточным охлаждением реагентов посторонним хладоагентом во внутренних теплообменниках; г – полочный аппарат с промежуточным охлаждением холодной исходной газовой смесью, поступающей на катализ; д – полочный аппарат с промежуточным охлаждением во внешних теплообменниках; е – полочный аппарат с вводом холодных реагентов между ступенями процесса; ж – трубчатый аппарат с охлаждением посторонним хладоагентом; з – трубчатый аппарат с охлаждением реагентов холодной исходной газовой смесью; и – трубчатый аппарат с двойными теплообменными трубами

Рисунок 5 – Принципиальные схемы контактных аппаратов

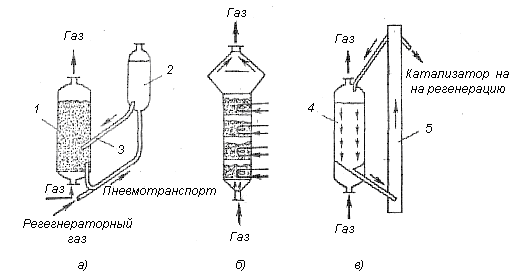
с неподвижным катализатором

Режим движения газового потока в реакторах с неподвижным слоем катализатора приближается к режиму идеального вытеснения.

Контактный аппарат с катализатором в виде сетки применяется в тех случаях, когда скорость реакции очень велика.

Многополочные контактные аппараты применяются, когда необходимо проводить процесс по ЛОТ.

Особое положение занимают реакторы с псевдоожиженным и движущимся катализатором (рисунок 6). Реакторы с псевдоожиженным слоем могут быть однослойными и многослойными. В однослойном реакторе часть катализатора непрерывно выводится на регенерацию, и такое же количество регенерированного катализатора возвращается в реактор. Эти реакторы используют в тех случаях, когда катализатор быстро снижает свою активность.



а – аппарат с одним псевдоожиженным слоем катализатора; б – полочный многослойный аппарат с псевдоожиженными слоями катализатора; в – аппарат с движущимся катализатором; 1, 4 – контактный аппарат; 2 – регенератор; 3 – катализаторопровод; 5 – подъемник

Рисунок 6 – Принципиальные схемы контактных аппаратовс псевдоожиженным слоем катализатора и сдвижущимся катализатором