



КАТАЛИЗАТОРЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ — ПЕРЕХОД НА РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Оглавление	2
Введение	3
Физико-химические основы катализа	6
Основные типы каталитических процессов	10
Развитие каталитических процессов	16
Современные подходы к разработке катализаторов	19
Российский рынок катализаторов	25
Выводы	31

Введение

2022-й стал годом испытаний для российской экономики и, в частности, для химической промышленности. Логистические трудности, финансовые ограничения, разрывы в производственных цепочках, технологические санкции практически одновременно обрушились на российские компании, спровоцировав практически идеальный шторм на рынке. Кризис выявил ряд болевых точек российской химии и нефтепереработки — от отсутствия собственных перевалочных мощностей до значительной технологической зависимости от недружественных стран.

Спустя более чем полгода можно сказать, что эффект от ряда наложенных ограничений оказался краткосрочным, как, к примеру, проблемы с логистикой весной 2022 года, что по большей части разрешились (исключая несколько болезненных точек, например аммиак, метанол), либо персональные санкции, эффект от которых был нивелирован снижением доли подсанкционных владельцев в компаниях. Однако если часть ограничений химической отрасли удалось преодолеть относительно быстро, то технологические ограничения останутся существенным фактором, который будет влиять на развитие отрасли в ближайшие годы, а возможно, и десятилетия.

Технологические санкции включают несколько аспектов — это санкции на поставку оборудования (как, к примеру, санкции на поставку оборудования для нефтепереработки и полимеризации в рамках пятого санкционного пакета ЕС), санкции на поставки в Россию химикатов (в основном сложной химии: катализаторов, присадок). Косвенными технологическими санкциями можно считать уход зарубежных лицензиаров с российского рынка, что связано как с вышеперечисленными запретами, так и с нежеланием компаний нести возросшие риски от работы в России.

Нельзя сказать, что уход западных компаний приведет к фатальным последствиям для российской химии и нефтепереработки. За исключением ряда технологических направлений, по которым альтернатив западным технологиям нет, как, к примеру, для крупнотоннажного СПГ, большинство позиций подсанкционного оборудования может быть закуплено в нейтральных странах. Переориентирование закупок базовой химии, которая раньше импортировалась из недружественных стран, на поставки из Китая, Индии и других стран также является решаемой задачей.

Однако в случае более сложных химических веществ — компонентов топливных или полимерных присадок, а также катализаторов — замена западных поставщиков может быть более долгим и болезненным процессом. Далеко не вся продукция альтернативных производителей катализаторов обладает качеством, сопоставимым с продукцией ушедших западных компаний, и ее использование может ухудшить операционные показатели российских предприятий. Кроме того, что немаловажно, замена западных катализаторов на восточные не приведет к увеличению устойчивости российской химической отрасли и к структурной перестройке российской промышленности вообще. Без развития собственных компетенций отрасль останется придатком более технологически развитых экономик. А с учетом роли катализаторов в производстве топлива импортозависимость в данном сегменте несет существенные риски в части энергетической безопасности, что можно считать отдельным стимулом к развитию собственных компетенций в данном направлении.

Проблема зависимости российской химии от импорта катализаторов не нова. Полной импортонезависимости по каталитическим технологиям не было изначально: СССР, к примеру, импортировал катализаторы полимеризации олефинов. В России вместе с технологическим отставанием экономики в 90-е годы переставали работать и катализаторные предприятия, зачастую не выдерживая конкуренции с импортом. К середине 2010-х годов импортозависимость по катализаторам нефтепереработки и нефтехимии составляла свыше 60%. Рост санкционных рисков еще в середине 2010-х годов актуализировал вопрос о снижении зависимости российской химии от импорта ключевых компонентов. Развитие собственных катализаторных площадок стало ответом на возросшие риски санкционного давления. Уже к 2018 году импортозависимость по катализаторам нефтепереработки снизилась до 37%, в нефтехимии — до 26%. При этом стоит отметить, что по ряду процессов нефтехимии — это, к примеру, окисление параксилола (стадия получения ПЭТФ), окисление этилена (получение этиленоксида), полимеризации олефинов (получение полиэтилена, полипропилена) — доля импорта сохраняется на уровне 100%.

Текущая ситуация актуализировала вопрос импортонезависимости по ключевым технологическим решениям. Запрет на импорт катализаторов из ЕС привел к тому, что российские производители вынуждены искать аналоги тем каталитическим системам, что ранее закупались в недружественных странах. Решением этой задачи может стать развитие собственных научно-технологических компетенций и локализация ключевых каталитических производств на территории страны.

Физико-химические основы катализа

Катализ как химическое явление широко распространен в природе. Химические процессы, протекающие во всех живых организмах, зачастую являются каталитическими. Не только живая природа, но и современная химическая промышленность в текущем ее понимании без катализа была бы попросту невозможна. Если бы переработка химического сырья основывалась только на некаталитических процессах, удовлетворение потребностей человечества XXI века в продукции было бы задачей невыполнимой.

Более 90% химических процессов, осуществляемых в промышленности, являются каталитическими. Мировой рынок катализаторов составляет около \$39 млрд с ежегодным ростом 4,4%. Однако весь масштаб влияния катализаторов на мировую экономику отчетливо проявляется в том, что в создании более 20% мирового ВВП так или иначе участвуют катализаторы. В современном мире без катализаторов попросту невозможно:

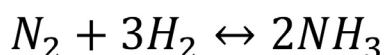
- производство качественного топлива (риформинг, изомеризация, каталитический крекинг и многие другие процессы нефтепереработки являются каталитическими);
- получение пластиков и других химических веществ (полимеризация этилена, окисление параксилола в ТФК и так далее);
- нейтрализация вредных выбросов (от фотокаталитического окисления вредных частиц в отходящих газах пищевого и других производств до нейтрализации стоков при помощи ферментов).

Довольно часто под катализом понимают изменение скорости химической реакции при помощи катализаторов — веществ, принимающих участие в химической реакции, но не входящих в состав конечных продуктов и не расходующихся в результате реакции. Данная трактовка явления катализа содержит несколько неточностей и является в целом тривиальной, но передает общий смысл данного явления. Внесение катализаторов в реакционную среду позволяет проводить процессы, которые в отсутствии катализаторов происходили бы в миллионы раз медленнее.

В общем случае без применения катализаторов регулировать скорость химической реакции можно посредством изменения температуры, давления, концентрации реагирующих веществ и их времени контакта. Однако совсем не обязательно, что увеличение этих параметров будет приводить к возрастанию выхода целевого продукта. Дело в том, что если реакция обратимая, как зачастую и бывает, то эти параметры влияют на скорость не только прямой реакции, но и обратной, а также на скорости побочных процессов. Зачастую при увеличении температуры/давления обратная реакция ускоряется в большей степени, чем прямая, и выход целевого продукта уменьшается (в таком случае говорят, что равновесие реакции смещается в сторону образования исходных соединений).

Рассмотрим этот тезис на примере реакции синтеза аммиака.

Аммиак производят из водорода и азота.



Если водород получают путем конверсии природного газа, то азот для реакции поступает из воздуха. В воздухе содержание азота около 78%. Азот — очень стабильная, инертная молекула, благодаря своей устойчивости практически не вступает ни в какие реакции при обычных условиях. Для того чтобы сделать молекулу азота реакционноспособной, то есть разорвать одни из самых прочных химических связей между двумя атомами азота $N \equiv N$, необходимо затратить большое количество энергии. Чтобы азот прореагировал с водородом и образовал молекулу аммиака, необходимо нагреть смесь этих газов. Однако просто нагревание результата не даст: при температурах выше 600 °C превращение N_2 и H_2 в аммиак практически невозможно. Причина этого заключается в том, что при такой температуре равновесие обратимой реакции (разложения молекулы аммиака на азот и водород) смещается в сторону образования исходных реагентов. Аммиак разлагается быстрее, чем образуется, и выделить его становится невозможно.

При более низких температурах получать аммиак удастся, но в очень малых количествах, так как скорость его образования ничтожно мала. Введение же в систему катализатора приводит к ускорению этой реакции в тысячи раз, и становится возможным проведение процесса при температурах около 450 °C.

Кроме того, изменение температуры, давления, концентрации и времени контакта реагирующих соединений всегда сложным образом отражается на выходе продуктов в комплексном технологическом процессе, состоящем из большого количества последовательных и параллельных реакций. Так, изменение времени контакта сырья с катализатором сказывается на степени его превращения и выходах продуктов каталитического крекинга (рис. 1). Чем меньше продолжительность пребывания сырья в реакционной зоне, тем ниже глубина его конверсии, и выходы многих продуктов каталитического крекинга зависят от времени контакта нелинейно.

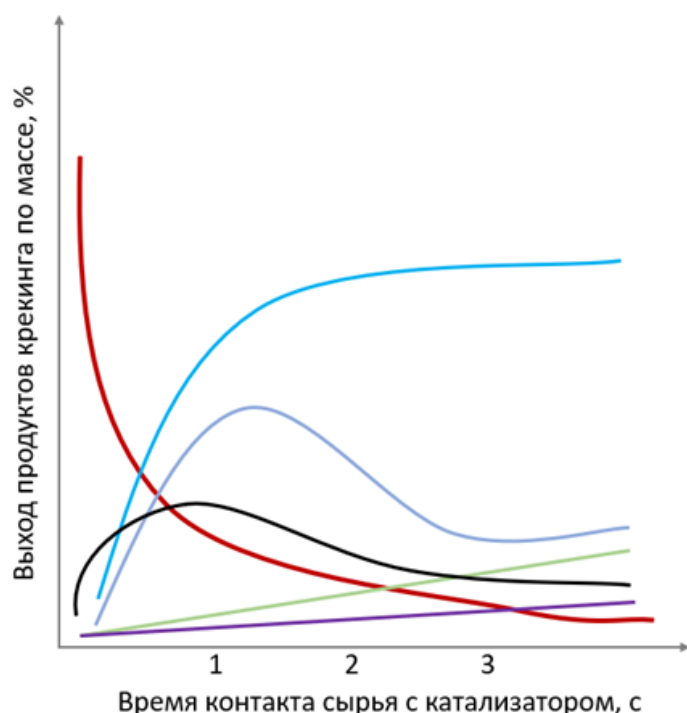


Рисунок 1.

- Степень превращения сырья
- Выходы бензина
- Газообразных углеводородов
- Легкого газойля
- Кокса (5)
- Изменение активности катализатора при постоянной температуре

Нельзя не учитывать тот факт, что увеличение температуры и давления почти всегда требует не только повышенных энергетических затрат, но и более сложных и дорогих реакторов, соединений и другого технологического оборудования, которое гарантировало бы производственную безопасность при ужесточении условий процесса. Таким образом, без катализаторов большинство реакций, которые стали привычными для химического производства, были бы экономически невыгодны либо попросту нереализуемы.

Итак, катализ — явление ускорения термодинамически возможной химической реакции за счет специфического действия катализаторов. Введение в систему катализаторов увеличивает скорость реакции на несколько порядков, за счет чего они протекают в более мягком режиме, при более низких температурах и давлениях, что в сочетании с оптимизацией реакторов и производств в целом играет ключевую роль в снижении как капитальных, так и операционных затрат химических предприятий.

Рассмотрим, каким образом протекают каталитические реакции.

В общем случае химической реакции **Вещество 1 + Вещество 2 → Вещество 3**

исходные и конечное вещества обладают определенной энергией. Для осуществления превращения исходных веществ в продукт необходимо, чтобы исходные вещества приобрели энергию, достаточную для разрыва химических связей в них (как, например, связи между атомами азота в процессе синтеза аммиака), и преодолели так называемый энергетический, или активационный, барьер. Чем выше этот активационный барьер, тем большую энергию необходимо затратить, чтобы осуществить превращение (рис. 2). Данная энергия может подводиться к реагирующим соединениям в виде тепла или ультрафиолетового излучения и других форм передачи энергии.

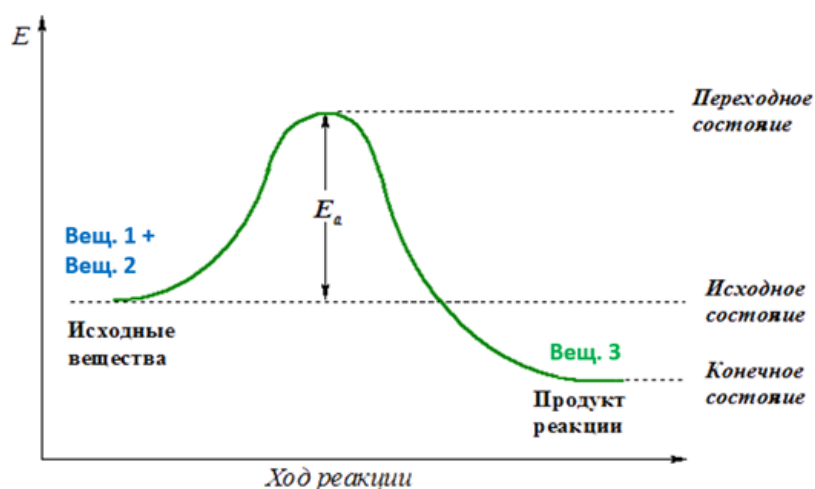


Рисунок 2.

Энергетический профиль реакции. Иллюстрация величины энергетического барьера, который необходимо преодолеть для превращения исходных веществ в продукт

Именно высокий активационный барьер реакции обуславливает необходимость создания агрессивных условий для проведения химических процессов. Снижение активационного барьера приведет к существенному снижению затрат энергии, необходимой для осуществления превращения. Для большинства химических реакций энергии активации составляют от нескольких десятков до нескольких тысяч кДж/кг. Добавление к реагирующим соединениям катализатора как раз позволяет этот энергетический барьер снизить. Принято считать, что катализатор главным образом работает потому, что снижает энергию активации реакции. Притом кажущееся, на первый взгляд, небольшое снижение в энергии активации способствует увеличению скорости химической реакции на несколько порядков (таблица 1).

Таблица 1. Ускорение химической реакции разложения пероксида водорода (H_2O_2) на воду и кислород под действием различных катализаторов

Катализатор	Е активации, кДж/кг	Скорость разложения H_2O_2 , кг/сек
-	2000	10^{-9}
HBr	1500	10^{-5}
Fe^{2+}/Fe^{3+}	1200	10^{-4}
Фермент каталаза	230	10^6

Механизм снижения энергии активации с использованием катализатора заключается в следующем. С участием катализатора реакция протекает совершенно по иному пути, который требует меньших затрат энергии. Каталитическая реакция между веществами состоит из набора последовательных стадий. Энергия активации каждой из этих стадий оказывается ниже, чем для случая некаталитической реакции (рис. 3). Таким образом, в присутствии катализатора веществам необходимо сообщить меньшее количество энергии, чем в случае его отсутствия (некаталитической реакции). Процесс становится энергетически, следовательно экономически и технологически, значительно более выгодным. За счет каталитического ускорения реакций промышленно важные процессы протекают с высокой эффективностью при технологически приемлемых условиях.

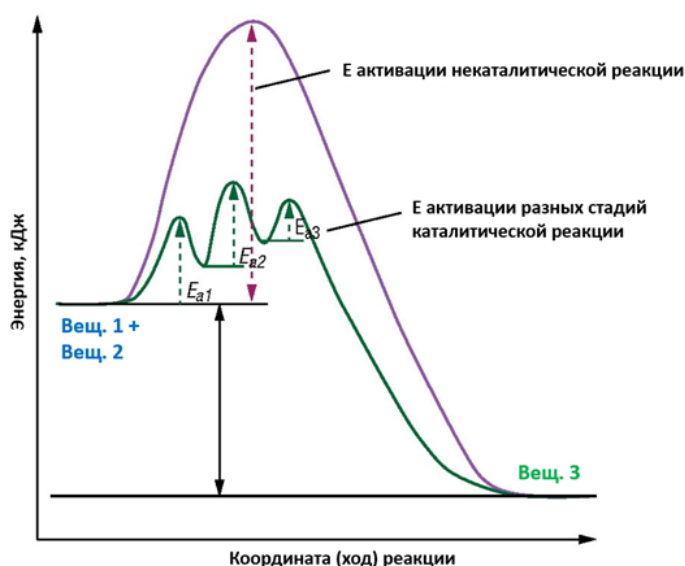


Рисунок 3.

Изменение энергии реагирующих соединений в ходе каталитической и некаталитической реакции

Таким образом, в упрощенном смысле катализаторы обеспечивают снижение энергии активации химических процессов, направляя реакцию по новому пути. Внесение катализаторов позволяет существенно оптимизировать условия протекания химических процессов — снизить температуру и давление, что в сочетании с другими факторами делает физически возможной реализацию на практике химических процессов.

Основные типы каталитических процессов

Существует большое многообразие как каталитических процессов, так и катализаторов к ним. Каталитические реакции могут осуществляться в газообразных (к примеру, каталитический крекинг) и жидких средах (жидкофазная полимеризация). Среди катализаторов существует большое многообразие их форм и типов — от атомов и молекул до больших как органических, так и неорганических структур, например ферментов и цеолитов. Широкое многообразие катализаторов порождает большую вариативность возможных классификаций данных соединений. Катализаторы могут классифицироваться по механизму действия, типу активного компонента, агрегатному состоянию и так далее. Однако традиционно выделяют три основных типа катализа, а как следствие, и катализаторов, которые в нем принимают непосредственное участие: ферментативный, гомогенный и гетерогенный.

В ферментативном катализе веществами, ускоряющими химические реакции, являются большие белковые молекулы, называемые ферментами (энзимами). Они обладают особой специфической формой, идеально подходящей для перевода реагирующих молекул в наиболее подходящую для реакции конфигурацию, что позволяет проводить реакции очень селективно и эффективно.

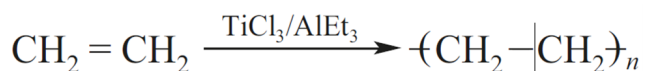
Разнообразные ферменты катализируют большинство реакций в живых организмах, участвуют в формировании белка, молекул ДНК и других жизненно важных процессах. Однако если говорить о доле ферментативного катализа в промышленности, то она сравнительно небольшая и составляет $\approx 3\%$ от всех каталитических процессов. Причина этому лежит в стоимости ферментов и их неустойчивости. Основные сектора, где используется ферментативный катализ, — фармацевтика, производство пищевых продуктов.

Сектор	Фермент	Применение
Фармацевтика	Нитрилгидратаза, трансаминаза, моноаминоксидаза, липаза, пенициллинацилаза	Производство лекарственных препаратов
Пищевая химия	Трипсин, амилаза, глюкоизомераз, папаин, пектиназа	Производство глюкозы, пребиотиков, необходимых для приготовления напитков соединений
Производство биотоплив	Липаза, целлюлаза, ксиланаза	Получение биодизеля, биоэтанола
Целлюлозно-бумажная промышленность	Липаза, целлюлаза, ксиланаза	Улучшение потребительских свойств бумажной продукции

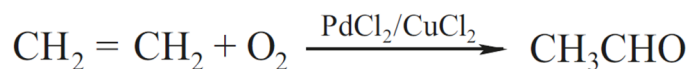
Таблица 2. Крупнотоннажные промышленные ферментативные каталитические процессы

Гомогенным катализ называют, когда катализатор и реагенты находятся в одной среде. Например, либо все они находятся в газе, либо, что встречается более часто, реагируют в жидкой фазе. В химической промышленности используется большое количество гомогенных каталитических систем. Например, производство спиртов из алкенов катализируется жидкими кислотами, получение уксусной кислоты из метанола катализируется жидкими органометаллическими комплексами родия. Но все-таки основными промышленными процессами, протекающими с участием гомогенных катализаторов, являются:

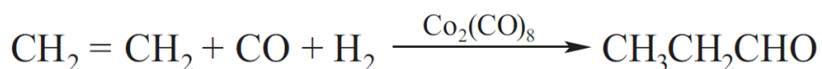
— получение полиэтилена, полипропилена и других полимеров в присутствии катализаторов Циглера — Натты, которые представляют собой сложные комплексы, образуемые при взаимодействии основного компонента TiCl_3 или TiCl_4 с сокатализатором $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ или $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Cl}$:



— получение ацетальдегида в Вакер-процессе:



— получение альдегидов, применяемых для синтеза ПАВ, пластификаторов, пропионовой кислоты в процессе гидроформилирования.



Хотя гомогенные каталитические процессы являются в большинстве случаев крайне селективными, эффективными и протекающими при сравнительно мягких условиях, они имеют существенный недостаток, а именно выделение гомогенных катализаторов из реакционной смеси и их рецикл (повторное использование) являются крайне сложной задачей. Зачастую задача нереализуема, и катализатор оставляют в конечном продукте, что, к примеру, характерно для процессов полимеризации. В основном по этой причине только ~ 16% промышленных каталитических процессов протекает с участием гомогенных катализаторов. И эта цифра постепенно снижается.

Этих недостатков лишены гетерогенные катализаторы. В случае гетерогенного катализа становится возможным проведение процессов в высокопроизводительном непрерывном режиме. Главным образом поэтому, при наличии возможности, все каталитические процессы стараются перевести на гетерогенные катализаторы.

В гетерогенном катализе реакции веществ в газовых или жидких средах ускоряются твердыми катализаторами. Гетерогенные катализаторы, применяемые в промышленности, представляют собой механически прочные частицы самых разнообразных форм и размеров, где зачастую содержание собственно каталитически активного материала незначительно (к примеру, массовая доля цеолита в гранулах цеолитного катализатора может составлять несколько процентов, остальное — связующее, чья роль — придавать гранулам катализатора механические свойства). Это могут быть сферические, цилиндрические, кольцевидные и так далее форм-факторы (рис. 4).



Рисунок 4. Различные формы гетерогенных катализаторов

Не только форма, но и размер частиц гетерогенных катализаторов является важным параметром и определяется конкретной технологией процесса и его условиями. Дело в том, что форма и размер гранул гетерогенного катализатора определяют гидравлическое сопротивление слоя, через который проходят реагирующие вещества. Кроме того, размер и форма гранул катализатора влияют и на процессы массо- и теплопереноса, на механическую устойчивость и другие факторы. Так, например, у катализаторов так называемого кипящего слоя (используются в реакторах кипящего слоя, где катализатор не статически размещен в реакторе, а кипит в слое сырья) преимущественной формой частиц является сферическая, как наиболее устойчивая к истиранию. Размер частиц, применяемых в кипящем слое, обычно на порядок ниже, чем в неподвижном слое. В жидкофазных процессах размер частиц еще меньше. Самый явный пример — крекинг нефтяных фракций: в реакторах с неподвижным слоем катализатора применяют гранулы размером 2–5 мм, в технологии кипящего слоя используют микросферические катализаторы диаметром 20–50 мкм. Некоторые каталитические технологии крекинга основаны на применении пылевидных катализаторов с размером частиц в несколько микрон.

В случае каталитических превращений газов, когда скорости газовых потоков очень высоки, например при окислении аммиака в производстве азотной кислоты или нейтрализации газовых выбросов ТЭЦ, применяют сетчатые металлические катализаторы. Довольно часто для более эффективного использования дорогостоящих благородных металлов (Pt, Pd, Ru, Rh и другие) их наносят на пористые носители типа пемзы, активированного угля, силикагеля или алюмогеля с высокоразвитой поверхностью. В целом почти всегда гетерогенный катализатор состоит из нескольких компонентов. Например, катализатор каталитического крекинга примерно на 20% состоит из определенного типа цеолита (коммерческое название Y) — активного компонента, на 80% из матрицы, состоящей из оксидов алюминия и кремния. Иногда в состав катализаторов каталитического крекинга добавляют узкоспециализированные промоторы, к примеру иные виды цеолита (например, MFI, коммерческое название ZSM-5), для увеличения октанового числа получаемых бензинов и так далее.

Твердые гетерогенные катализаторы сочетают в себе большое количество преимуществ. Они довольно просто отделяются от реакционной смеси, как следствие, могут эксплуатироваться в большом количестве циклов. Гетерогенные катализаторы чаще всего являются пористыми соединениями с большой площадью поверхности и строго заданным размером пор. В гетерогенном катализе позитивную роль играют молекулярно-ситовые эффекты, за счет которых одни молекулы благодаря своим небольшим размерам селективно проникают в поры катализатора и там реагируют, тогда как молекулы большего размера в поры катализатора проникнуть не способны. Все эти факторы в совокупности делают именно гетерогенные катализаторы движущей силой современных химических и нефтехимических производств.

Гетерогенные катализаторы в производстве неорганической химии

Гетерогенные катализаторы используются в большинстве крупнотоннажных процессов получения неорганических соединений. Производство водорода и синтез-газа (смеси CO и H₂) из метана и других углеводородов путем парового риформинга включает большое количество стадий с участием различных катализаторов. Синтез аммиака и основная стадия производства серной кислоты — окисление SO₂ до SO₃ — являются каталитическими процессами. Получение азотной кислоты из аммиака по методу Оствальда, получение серы из H₂S по методу Клауса также являются процессами каталитическими. Основные крупнотоннажные каталитические процессы получения неорганической химии представлены в таблице.

Процесс	Реакция	Катализатор (основной компонент)
Получение водорода в паровом риформинге метана	$H_2O + CH_4 \rightarrow 3H_2 + CO$	Никель, нанесенный на оксид алюминия (Ni/Al ₂ O ₃)
Получение водорода паровой конверсией CO	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$	Железо, нанесенное на оксид хрома Fe/Cr ₂ O ₃
Получение метана из синтез-газа	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	Никель, нанесенный на оксид алюминия (Ni/Al ₂ O ₃)
Получение аммиака	$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$	Оксид железа с примесями оксидов калия и алюминия (Fe ₃ O ₄ , K ₂ O, Al ₂ O ₃)
Стадия получения серной кислоты — окисление SO ₂ до SO ₃	$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$	Оксид ванадия (V ₂ O ₅)
Стадия получения азотной кислоты — окисление NH ₃ до NO	$2NH_3 + 4O_2 \rightarrow 2NO + 3H_2O$	Платиновые и родиевые сетки (Pt/Rh)

Таблица 3. Крупнотоннажные промышленные процессы неорганической химии, осуществляемые с участием гетерогенных катализаторов

Катализаторы органических процессов

Отраслями химической промышленности с самым масштабным применением гетерогенных катализаторов являются, без сомнения, сходные по технологиям отрасли нефтегазохимии, нефтепереработки и органического синтеза. Бензин, дизельное топливо, керосин, печное топливо, ароматические соединения, сжиженные углеводороды, полимерные соединения — вот лишь небольшая доля того, что получается в ходе каталитических процессов нефтепереработки, нефтегазохимии (таблица 4).

Процесс	Катализатор (основной компонент)
Крекинг различных фракций нефти с целью получения топлива и других продуктов	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ /цеолиты
Гидрокрекинг высококипящих нефтяных фракций с целью получения топлива и других продуктов	$\text{MoO}_3/\text{CoO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni}/\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, Pd /цеолиты
Гидроочистка нефтяных фракций	Сульфиды кобальта, никеля, молибдена, нанесенные на оксид алюминия $\text{CoS}/\text{NiS}/\text{MoS}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
Каталитический риформинг	$\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$
Процессы изомеризации	$\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ /цеолиты
Деалкилирование ароматических соединений в бензол	$\text{MoO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$
Диспропорционирование толуола в бензол и ксилолы	$\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ /цеолиты

Таблица 4. Основные технологические процессы нефтепереработки, осуществляемые с участием гетерогенных катализаторов

Аналогично можно перечислять нефтехимические процессы. В них разнообразие как реакций, так и используемых каталитических композиций еще выше по сравнению с нефтепереработкой. В состав катализаторов перечисленных базовых процессов химической промышленности входит значительное количество химических элементов и соединений. Только из приведенных примеров катализаторов видно, что развитие собственного каталитического производства на импортонезависимой основе требует параллельного создания собственной компонентной базы для каталитических производств.

Развитие каталитических процессов

Первые промышленные каталитические процессы датируются серединой XVIII века. Тогда в Англии стали появляться первые производства серной кислоты, серный ангидрид для которой получали совместным сжиганием серы и селитры. Каталитическую роль здесь выполняли оксиды азота, в присутствии которых происходило полное окисление серы. Разумеется, на тот момент их каталитическая роль не была осознана, но данный процесс можно по праву считать одним из первых процессов промышленного катализа в химии. Процесс получения серной кислоты был в 1831 году улучшен, в нем стал использоваться гетерогенный катализатор — платина, а позднее, в XIX веке, его сменил используемый до сих пор в производстве серной кислоты катализатор — оксид ванадия.

Девятнадцатое столетие стало веком бурного развития химической технологии и вместе с ней каталитических процессов. В 1838 году разработан процесс окисления аммиака до азотной кислоты в присутствии платиновых катализаторов. Коммерциализация процесса произошла значительно позднее, в 1906 году, когда промышленный спрос развитых европейских экономик на нитраты стал расти опережающими предложения темпами, а также появились первые промышленные процессы синтеза аммиака.

Использование каталитических процессов для защиты окружающей среды также имеет давнюю историю. Впервые катализаторы были применены здесь для очистки отходящих газов на ключевом химическом процессе XIX века — производстве соды. Пары хлороводорода окислялись в присутствии катализатора — хлорида меди (Deacon process, 1875 год) с получением хлора и дальнейшей его нейтрализации известью.

Если от XVIII до первой половины XIX века ключевой задачей химической индустрии было производство неорганических веществ: соды, кислот, щелочей, то начиная с середины XIX века в промышленности начинают активно внедряться процессы органической химии. Первые органические процессы были связаны с получением синтетических красителей, к примеру анилиновых. Именно в 60-е годы позапрошлого века возник современный химический гигант BASF (Badische Anilin und Sodafabrik), на тот момент объединявший два

наиболее актуальных направления химической индустрии — производство соды и анилина. Развитие спроса на органические соединения потребовало создания новых технологий их синтеза. Можно привести пример разработки компанией BASF каталитической технологии синтеза метанола из синтез-газа в 1923 году, производство спиртов каталитическим гидрированием жиров в 1930-х и многие другие технологии.

Если вплоть до 30-х годов XX века ключевым источником органических веществ для промышленности была переработка угля, то развитие нефтедобычи дало новый источник сырья для химии. Хотя первая нефтяная скважина была пробурена в 1859 году, современная нефтеперерабатывающая промышленность по-настоящему возникла только с развитием процесса каталитического крекинга. Его внедрение стало настоящим прорывом, открывшим путь к переработке тяжелых нефтяных фракций и получению высокооктанового топлива. Дальнейшее развитие каталитических процессов нефтепереработки — риформинга, алкилирования, гидрокрекинга и так далее — позволило нефтепереработке прийти к ранее недостижимым уровням выхода топлив на современных НПЗ.

Открытие процесса полимеризации в начале прошлого века привело к созданию отдельной области химического знания — химии полимеров, а также отдельного подраздела каталитической науки — катализаторов полимеризации. Начавшаяся с каучуков в начале XX века имплементация процессов полимеризации в промышленную практику привела к появлению ряда новых технологических процессов, открыв человечеству целое поколение новых материалов.

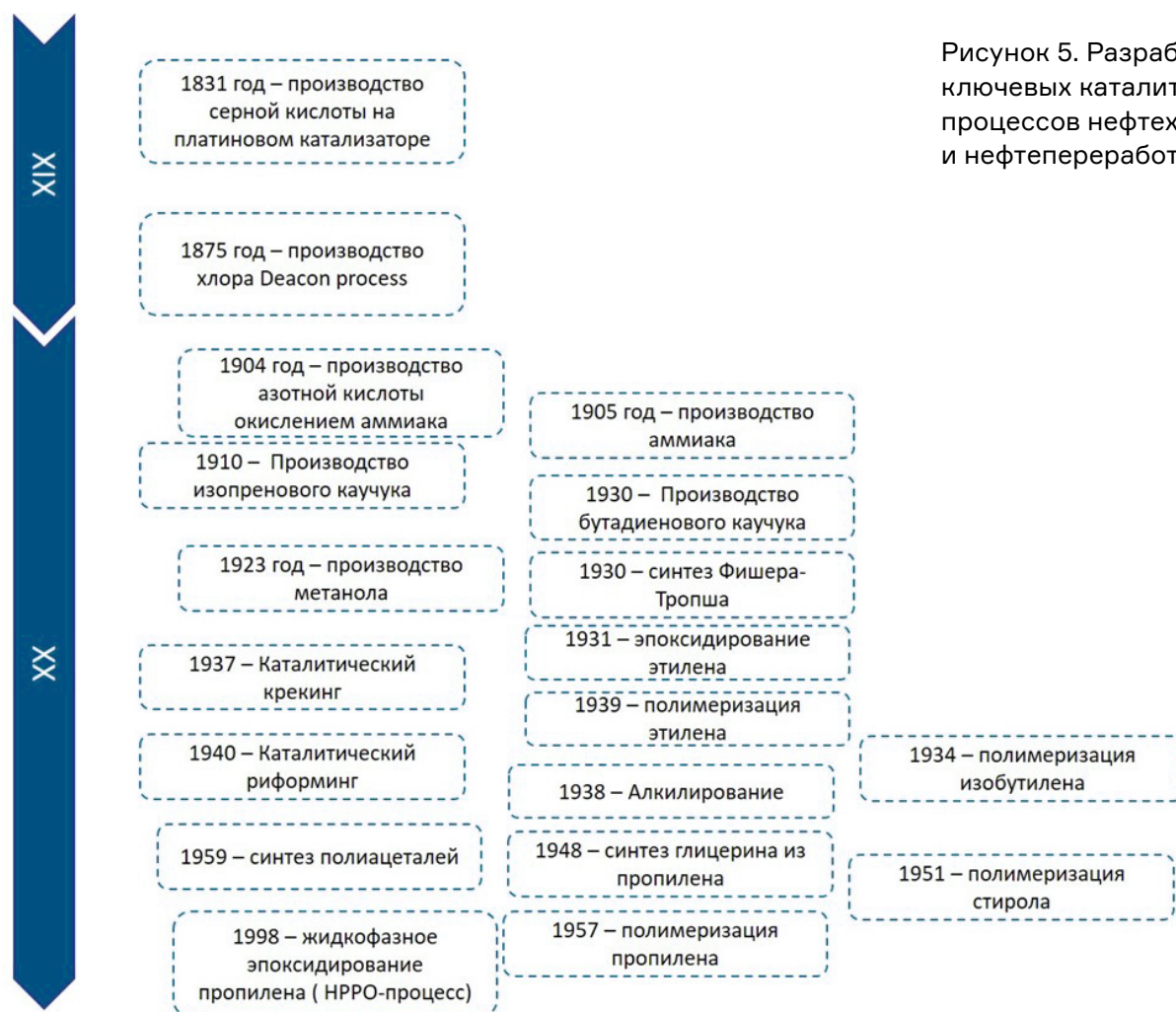


Рисунок 5. Разработка ключевых каталитических процессов нефтехимии и нефтепереработки

Изначально катализ рассматривался как наука, которой занимались в основном в академических кругах. Со временем, когда возник спрос на производство значительных объемов катализаторов, появились небольшие промышленные компании, специализирующиеся на производстве этого сегмента химии. В этих компаниях часто работали представители академических кругов, таким образом, происходил трансфер наиболее актуальных научных представлений и разработок в прикладную индустрию. Параллельно этому процессу развивалась промышленность по производству компонентной базы для синтеза катализаторов — производство оксидов железа, ванадия, церия, хрома, меди и марганца, цеолитов, благородных металлов и многого другого.

Вместе с ростом спроса на катализаторы и каталитические исследования крупные научные институты стали формировать специализированные направления и факультеты по исследованию катализа. Некоторые промышленные компании в конце концов создали свои собственные лаборатории фундаментальных исследований в 1940–1970-х годах (Dow, GE, DuPont, BASF, ICI, Monsanto и другие). Параллельно регуляторы, ранее предоставлявшие финансирование на научные исследования через институты и университеты, стали также напрямую создавать каталитические лаборатории, финансируемые непосредственно из федерального бюджета. Здесь можно привести примеры национальных лабораторий США в Ок-Ридже, Сандии и Хэнфорде, Институт Макса Планка в Германии, Новосибирский институт катализа имени Г.К. Борескова в Советском Союзе и многие другие научные учреждения.

Именно эти инвестиции в создание научных и прикладных школ по всему миру, поддержка научной коллаборации и трансфера современных разработок в прикладную область позволили совершить тот скачок в химической индустрии, результаты которого мы наблюдаем в повседневной жизни.

Современные подходы к разработке катализаторов

Как уже было отмечено, в промышленности применяется большое многообразие различных гетерогенных катализаторов. За более чем столетний период исследований каталитических процессов разработаны десятки подходов к синтезу катализаторов, написаны десятки и сотни учебников на эту тему. Каталитическая химия продолжает развиваться, разрабатывая как новые катализаторы для новых химических процессов, так и совершенствуя уже существующие, казалось бы, хорошо известные материалы. В этой части опишем общий подход к разработке катализаторов.

Синтез каталитического материала обычно состоит из последовательных стадий. К ним относится стадия получения активного компонента (к примеру, цеолита), введения в этот материал добавок, отжига (зачастую многократного) каталитического материала при высокой температуре в лабораторных и промышленных печах в токе воздуха или инертного газа. Итоговой стадией обычно является формирование гранул из порошка катализатора со связующим. Количество стадий синтеза катализатора зависит от сложности его состава и для некоторых видов промышленных катализаторов превышает десятки стадий.

Цель таких многостадийных синтезов — создать каталитический материал с заданным набором характеристик. Высокая активность в конкретной реакции является недостаточным условием для использования катализатора в технологическом процессе. Хороший катализатор должен обладать комплексом свойств. Ниже приведены ключевые из них.

- Высокая активность.
- Высокая селективность по отношению к целевому продукту. Селективность является одной из основных характеристик катализатора. Она определяется как способность катализатора избирательно увеличивать скорость одной из реакций (целевой реакции) при наличии нескольких побочных. Особенно высокой селективностью отличаются ферменты (их селективность достигает 95–100%), затем идут гомогенные катализаторы. Селективность гетерогенных катализаторов обычно ниже.
- Устойчивость к дезактивации. Катализатор должен сохранять свою высокую активность в течение как можно более длительного времени под воздействием агрессивных условий реакционной среды. К примеру, срок службы катализаторов синтеза аммиака может составлять несколько лет.
- Высокая механическая устойчивость. В ходе транспортировки катализатора, засыпания его в реактор или в ходе самой реакции гранулы катализатора не должны разрушаться.
- Утилитарность использования. Эксплуатация катализатора должна быть настолько проста, насколько это возможно. Оптимальным зачастую является не самый эффективный катализатор (с точки зрения конверсии/селективности), а наиболее утилитарный/простой в использовании.

Разработка катализатора — сложный и многогранный процесс, в ходе которого формулируются стадии синтеза катализатора. Хотя в истории развития каталитической химии встречались редкие случайные открытия, в большинстве своем перед успешным внедрением катализатора следует большое количество подготовительных шагов. Каждый из данных шагов имеет строго определенные цели и требует наличия необходимого оборудования, реактивов, компетентного в различных отраслях химии, физики, инженерии персонала. Общая схема разработки катализатора показана на рисунке 6.

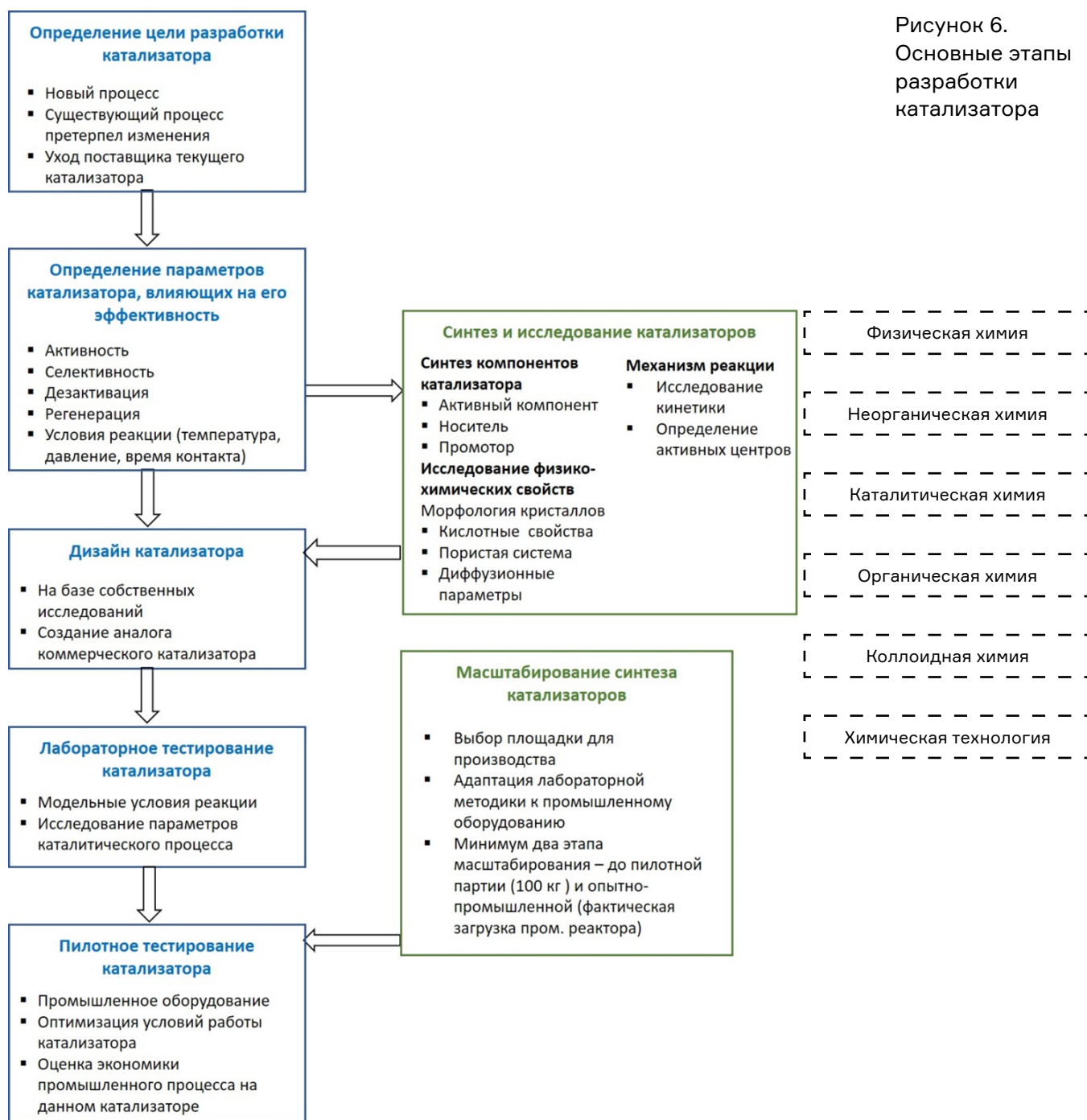


Рисунок 6.
Основные этапы
разработки
катализатора

На первой стадии исследования формулируется его цель. В среднем потребность в разработке нового катализатора встает в трех случаях:

1. Катализатор необходим для совершенно нового процесса. Можно привести пример возникновения процесса каталитического крекинга в 30-х годах прошлого века или более современный процесс жидкофазного окисления пропилена пероксидом водорода на титаносиликатных катализаторах (HPPO-процесс BASF).
2. Уже существующий процесс претерпел некоторые изменения: поменялось качество сырья, температурные режимы, какие-то другие параметры.

3. Существующий работающий катализатор требует замены на аналог из-за ухода поставщика, политических или логистических ограничений. Задача импортозамещения катализаторов относится именно к этому случаю.

Первый подход обычно идет от научной разработки нового катализатора и протекает одновременно с разработкой процесса. Так, например, разработки титаносодержащих цеолитных катализаторов в 80–90-х годах прошлого века привели к появлению низкотемпературного процесса прямого окисления пропилена перекисью водорода.

Два других подхода часто пересекаются. В обоих случаях существуют конкретные параметры процесса, в которые необходимо встроить катализатор с требуемыми свойствами. Если говорить про второй подход — адаптацию катализатора под изменения условий процесса, — то можно привести следующий пример. Паровой риформинг до 1960-х годов протекал при относительно низком давлении. После появления более экономичных центробежных компрессоров давление при проведении риформинга необходимо было увеличить. Более высокое давление, в свою очередь, потребовало более активных и стабильных катализаторов. Такие катализаторы были созданы путем увеличения содержания в катализаторе одного из компонентов — кремнезема. Подобная работа по модификации и улучшению свойств катализаторов является рутиной каталитических промышленных лабораторий.

Хотя задача создания собственных каталитических производств в контексте импортозамещения стала особенно актуальна для нашей страны в последние месяцы, некоторые игроки к такому развитию событий оказались в той или иной степени готовы. Так, «Газпром нефть» уже завершает создание собственного катализаторного завода в Омске с локализацией катализаторов крекинга, гидрокрекинга и гидроочистки, проект которого возник задолго до текущих событий. Однако данный проект локализации производства катализаторов можно считать практически единичным, и задача каталитического импортозамещения не замыкается только на топливно-энергетическом комплексе. Российская химическая отрасль в среднесрочной перспективе сохранит дефицит по катализаторам полимеризации олефинов, окисления параксилола и других нефтехимических процессов, что потребует дополнительных инвестиций в разработки и исследования по данным направлениям.

После определения целей каталитического исследования следует стадия определения стратегии научного исследования. Суть данного этапа — определение целевых каталитических показателей, которыми должен обладать будущий катализатор. К ним относятся активность, селективность, требования к дезактивации, регенерации и другие характеристики. Кроме того, на данном этапе формируется представление о том, в каком направлении будет происходить исследование, какие активные компоненты будут выбраны в качестве объектов исследования. Для этого проводится анализ патентной и научной литературы по исследуемому направлению. На основании проведенного анализа выбираются перспективные направления для дальнейших исследований.

После определения требуемых параметров катализатора и исследования литературы следующим шагом в лаборатории создаются образцы катализаторов, проводится исследование их физико-химических и каталитических свойств. Для тестирования каталитических материалов исследовательская лаборатория должна обладать либо собственным пулом научного оборудования, либо широким доступом к оборудованию научных центров. Стоимость только оснащения оборудованием собственной каталитической лаборатории без учета аренды и ремонта площадки может достигать сотен миллионов рублей.

На данном лабораторном этапе ключевой задачей является выявление взаимосвязей между физико-химическими свойствами образцов (размером кристаллов, кислотностью и прочими характеристиками) и их каталитической активностью. Выявление подобных закономерностей позволяет осуществлять дизайн необходимых материалов. Таким путем в лаборатории синтезируются образцы катализаторов, удовлетворяющие исходному запросу. Однако лабораторная разработка далека от промышленного внедрения. Следующим этапом становится масштабирование процесса синтеза катализатора на большие объемы.

Попытка масштабирования лабораторных разработок на большие объемы всегда является трудностью. Причины этого кроются в сложности контроля качества при производстве крупных партий катализаторов. При увеличении масштаба процесса большое значение приобретают процессы тепломассопереноса, а контроль за ними усложняется. К примеру, в лабораторной установке в слое катализатора толщиной несколько миллиметров можно осуществлять контроль температуры реакции с точностью до нескольких градусов. В промышленном реакторе, где толщина слоя катализатора может превышать несколько метров, разброс температуры по слою катализатора может достигать десятков и даже сотен градусов. Это приводит к тому, что катализаторы, демонстрировавшие прекрасные характеристики на лабораторном уровне, не переходят к промышленному использованию. Катализаторы могут быть чувствительны к перегреву или содержанию примесей в сырье конкретного завода или установки, в результате зачастую даже использование одного и того же катализатора на разных промышленных площадках не дает сходных результатов. Масштабирование каталитических технологий — отдельная задача, требующая собственных компетенций, отличных от навыков лабораторных исследований. Если проблем с площадками по лабораторному созданию и тестированию катализаторов в России нет, то площадки, на которых можно осуществить масштабирование синтеза катализатора и его тестирование, за редким исключением, морально и технологически устарели. В качестве такого положительного исключения можно также назвать инициативу «Газпром нефти» по созданию центра испытаний катализаторов «Селектум», запущенного в 2021 году. Площадка объединяет в одном месте не только установки для пилотирования синтеза катализаторов, но и пилотные установки для тестирования образцов в различных процессах нефтепереработки. Пилотные установки на данной площадке представляют собой уменьшенные копии реальных промышленных объектов по производству и эксплуатации катализаторов нефтепереработки. Испытание на них катализаторов позволит значительно снизить риски и доработать технологию перед созданием и тестированием реальных промышленных партий на реальных промышленных установках.

В общем случае процесс перехода от лабораторных разработок к промышленным идет в несколько стадий с последовательным увеличением масштаба с нескольких граммов в лабораторном реакторе до нескольких сотен килограммов — нескольких тонн в опытно-промышленном. Одновременно с масштабированием синтеза идет масштабирование каталитического процесса. На финальной стадии исследований партия катализатора тестируется уже в промышленном реакторе.

Все описанные стадии требуют собственных компетенций и оборудования, которые далеко не всегда локализованы в периметре одной компании. К лучшим мировым практикам каталитических компаний можно отнести глубокую коллаборацию с научными организациями и исследовательскими центрами, которые участвуют в выполнении первой стадии лабораторных исследований. Если обобщить, для химических компаний существует несколько сценариев получения каталитических технологий.

- Покупка готового решения на рынке. Данный подход позволяет в кратчайшие сроки получить готовое решение с лицензионной поддержкой. Однако он имеет ряд базовых проблем. Основная — полная зависимость от поставщика, мировой экономической ситуации и политических рисков. Текущая ситуация показывает, что если закрывать все потребности компании по катализаторам только таким способом, то это несет в себе риски, связанные с санкциями или добровольным уходом поставщика с рынка. Существует и ряд других трудностей, с которыми компания может столкнуться при такой политике подбора катализаторов. Качество продукции может изменяться от партии к партии, а стоимость доставки и колебания курса национальных валют могут существенно влиять на итоговую цену.
- Развитие собственного производства. Примеры текущего дня — Ангарский завод катализаторов и органического синтеза («Роснефть»), строящийся Омский завод катализаторов («Газпром нефть»). Данный путь является оптимальным, так как весь цикл создания и производства катализатора контролирует компания. Однако он сопряжен с большими капитальными затратами, и мировой опыт показывает, что только наличие значительного рынка по производимым на данном заводе катализаторам может окупить инвестиции в развитие соответствующего производства.
- Аутсорс определенных этапов разработки катализатора различным контрагентам, чаще всего это делается в рамках НИОКР в ходе совместной работы науки и бизнеса над новыми разработками. В общем случае универсального рецепта для подбора катализатора под процесс не существует. Каждый случай требует тщательного анализа и сопоставления временных, финансовых затрат и рисков, которые готова на себя взять компания при разработке конкретного катализатора.

Российский рынок катализаторов

Основные российские мощности по производству катализаторов представлены в таблице 4.

Предприятие	Собственник	Установлен- ная мощ- ность, тонн/ год	Основная номенклатура катализа- торов и сорбентов
Стерлитамакский завод катализаторов, г. Стерлитамак	KNT Group	4000	Катализаторы гидроочистки, кат. крекинга
Ишимбайский специализи- рованный завод катализа- торов. Ишимбай	KNT Group	20 000	Катализаторы гидроочистки, кат. крекинга
«Газпромнефть — Катали- тические системы» (на ста- дии реализации) г. Омск	«Газпром нефть»	21 000	Катализаторы кат. крекинга, ги- дрокрекинга, гидроочистки
ОАО «Синтез-Каучук» г. Стерлитамак	ООО «УК ТАУ НефтеХим»	10 000	Катализаторы дегидрирования C4-C5, гидрирования примесей в изопрене (ИМ-2201)
ООО «Салаватский катали- заторный завод» г. Салават	ПАО «Газпром»	6000	Шариковый катализатор крекинга; адсорбенты-осушители
ООО «Новомичуринский катализаторный завод» г. Новомичуринск	ООО «НКЗ»	5000	Катализаторы процесса Кла- уса и «Сульфрен» (очистка от сероводорода)

Предприятие	Собственник	Установлен- ная мощ- ность, тонн/ год	Основная номенклатура катализа- торов и сорбентов
ООО «НПК «Синтез» г. Барнаул	ООО «НПК «Синтез»»	2500	Катализаторы дегидрирования, гидроочистки
АО «Газпромнефть — Омский НПЗ» г. Омск	ПАО «Газпром нефть»	3500	Катализаторы кат. крекинга
АО «СКТБ «Катализатор»» г. Новосибирск	АО «СКТБ «Катализатор»»	2500	Катализаторы дегидрирования, газоочистки; адсорбенты-осуши- тели на основе оксида алюминия
ЗАО «Промышленные ката- лизаторы» г. Рязань	ОАО «СКТБ «Катализатор»»	1600	Катализаторы риформинга и изо- меризации, гидроочистки, гидри- рования; адсорбенты-осушители
ООО «НИАП-катализатор» г. Новомосковск	ООО «НИАП-ката- лизатор»	1500	Катализаторы сероочистки, конверсии СО, метанирования; катализаторы для азотной про- мышленности и металлургии, ор- ганического синтеза
ОАО «Менделеевский химический завод» г. Менделеевск	ГК «ТАИФ»	1000	Катализаторы дегидрирования
АО «Ангарский завод ката- лизаторов и органического синтеза» г. Ангарск	ПАО «НК «Роснефть»»	1000	Катализаторы риформинга, изоме- ризации, гидроочистки и гидро- крекинга; адсорбенты-осушители
ООО «Новокуйбышевский завод катализаторов» г. Новокуйбышевск	ПАО «НК «Роснефть»»	600	Катализаторы гидроочистки
ЗАО «Нижегородские сор- бенты» г. Нижний Новгород	ЗАО «ХМК «Прерамет»»	600	Катализаторы гидроо- чистки, гидрирования; адсорбенты-осушители
АО «Самарский завод ката- лизаторов» г. Самара	ООО «Оте- чественный катализатор»	400	Катализаторы окисления серни- стого газа, очистки отходящих газов; катализатор олигомери- зации олефинов, зроматизации парафинов
ПАО «Новосибирский за- вод химических concentra- тов» г. Новосибирск	ГК «Росатом»	150	Цеолитные катализаторы получе- ния высокооктановых бензинов, ароматизации пропан-бутановой фракции

Таблица 4. Российские производители катализаторов

Ключевым сегментом спроса на катализаторы в России является нефтепереработка. С точки зрения каталитических процессов наибольший спрос наблюдается на катализаторы гидрокрекинга, катализаторы гидроочистки и катализаторы каталитического крекинга. В финансовом выражении в 2020 году объем рынка трех основных катализаторов составил около \$114 млн. Объем потребления катализаторов крекинга, гидроочистки и гидрокрекинга в России составлял более 17,5 тыс. тонн.

В целом российский рынок катализаторов можно оценить как сильно зависящий от импорта. Несмотря на то что ситуация начала меняться с 2015 года, когда вышел приказ Министерства энергетики № 210 «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности РФ», доля импорта все равно остается подавляющей — 83% по итогам 2019 года, хотя и снижается.

Совокупный импорт катализаторов в Россию составляет около 23–25 тыс. тонн в год. Значительный объем этих поставок приходится на страны еврозоны, а также другие недружественные страны. Совокупно их доля в российском импорте за 2021 год превысила 80%.



Рисунок 7. Импорт катализаторов в Россию, тыс. т

С точки зрения импорта в денежном отношении доля недружественных стран еще больше, в 2021 году она достигла 88% (рис. 8).

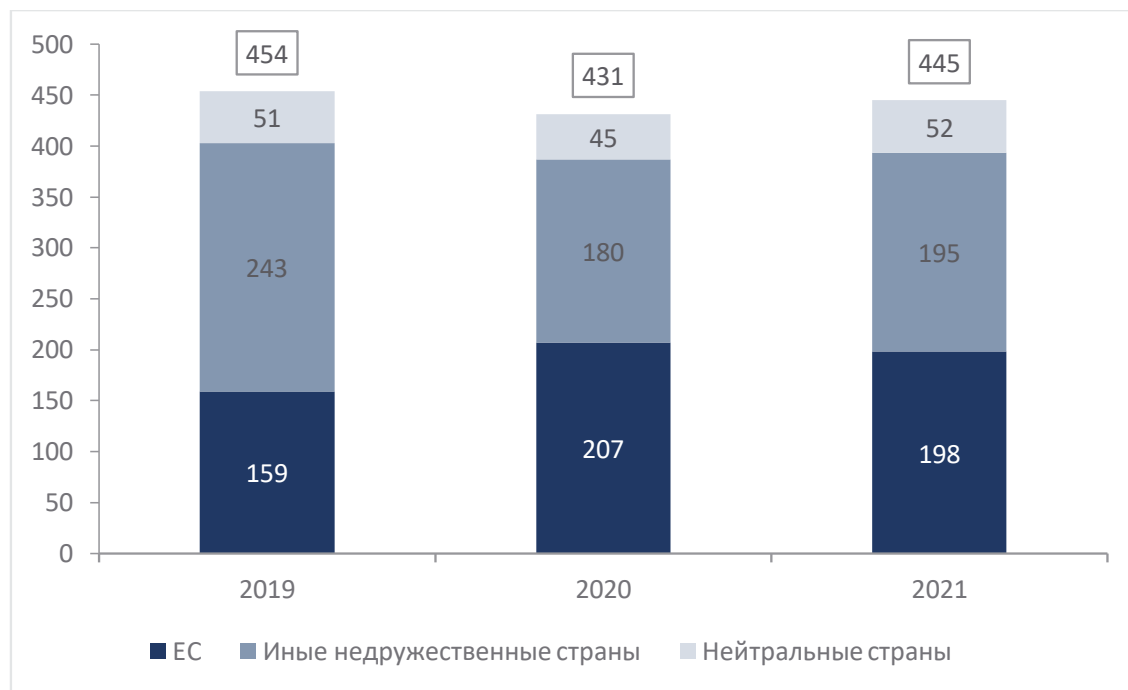


Рисунок 8. Импорт катализаторов в Россию, млн \$

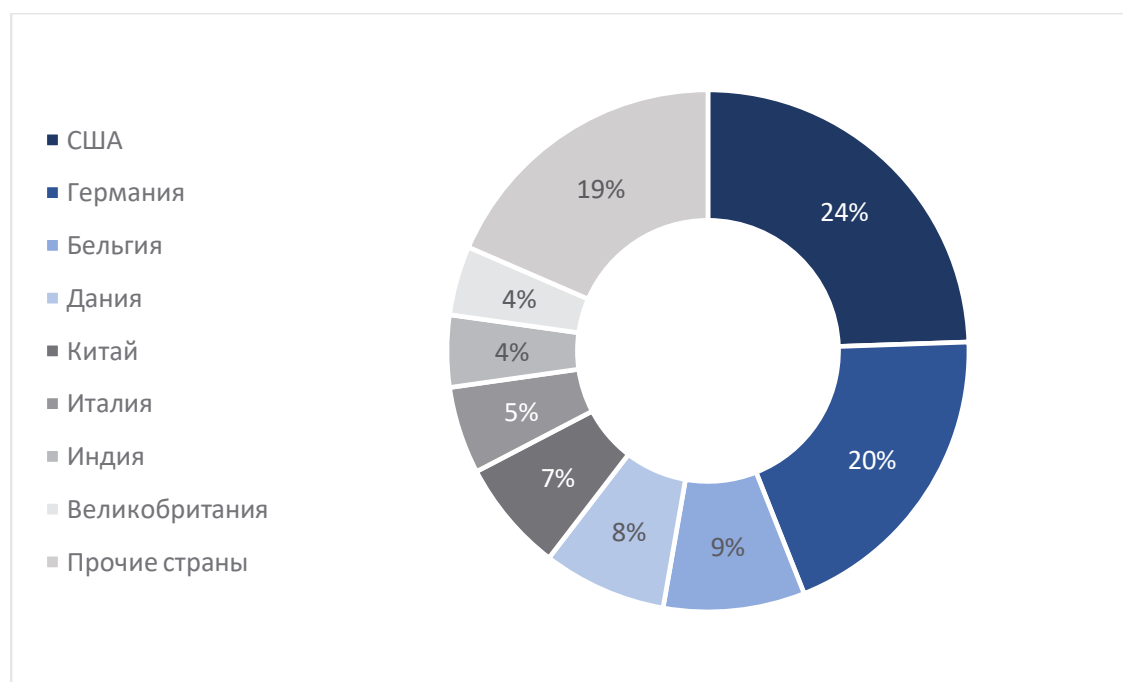


Рисунок 9. Импорт катализаторов в Россию по странам, тыс. т

С точки зрения стран ключевыми импортерами катализаторов в Россию остаются США и страны Западной Европы, в первую очередь Германия, Бельгия, Дания. Ключевые поставщики катализаторов на российский рынок — западные производители (Haldor Topsoe, Axens, UOP, BASF SE, Johnson Matthey и прочие).

Введение санкционного запрета на поставки катализаторов из этих стран ставит под удар российские производства, вынуждая отечественные компании к поиску альтернативных решений. Пока в России не создано импортозамещающих производств, основной альтернативой для закупки катализаторов и их компонентов может стать серый импорт, эффективность которого находится под вопросом, а также переориентация импортных поставок на нейтральные страны, в первую очередь Китай и Индию, уже в 2021 году занимавших более 10% в российском импорте катализаторов. В действительности практически любые виды катализаторов могут быть закуплены в Азии, однако их эффективность, стабильность работы могут быть значительно ниже западных аналогов.

Замена катализаторов на новые — нетривиальная задача, она не сводится только к засыпанию партии нового катализатора в установку. С этим процессом может быть связана адаптация режима эксплуатации каталитической установки, снижение операционных показателей технологического процесса, рост операционных затрат. В итоге замена западных катализаторов на восточные аналоги может не дать такого же уровня операционной эффективности российских предприятий, что был ранее.

Объем российского рынка катализаторов напрямую связан с объемом нефтепереработки и химического производства. Объемы нефтепереработки в России составляют около 280 млн тонн в год. С учетом санкционных рисков и ограничений на экспорт российских нефтепродуктов рост и даже сохранение объемов нефтепереработки в России находятся под риском. Притом что за счет налоговых стимулов государство практически вручную регулирует нефтепереработку, государственная отраслевая политика будет ключевым фактором, определяющим объемы переработки нефти в стране.

В проекте бюджета на ближайшие годы заложено некоторое сокращение объемов переработки нефти до уровней около 245 млн тонн к 2025 году. Вероятно, данное сокращение затронет наименее рентабельные, то есть наиболее простые НПЗ и не повлияет существенно на объем спроса на катализаторы, который продолжит расти с ростом облагораживающих процессов на российских НПЗ. В то же время дальнейшее развитие отрасли будет определяться не только способностью российских экспортеров-нефтепереработчиков находить рынки для своей продукции, но и доступом компаний к современным технологическим, в том числе каталитическим, решениям в условиях ухода западных лицензиаров с российского рынка. Не исключено постепенное возвращение отрасли к планам наращивания переработки нефти до заявлявшихся ранее 300–320 млн тонн в год.

С точки зрения катализаторов нефтехимии российский рынок существенно меньше, чем для катализаторов нефтепереработки. Если говорить о катализаторах полимеризации олефинов, то ежегодный спрос на них составляет около 2–3 тыс. тонн в год. Примерно столько же приходится на катализаторы полимеризации бутадиена, изопрена. Объем спроса на катализаторы окисления параксилола с получением терефталевой кислоты и окисления этилена с получением этиленоксида не превышает нескольких сотен тонн в год. Однако, если импортозамещение по среднетоннажным катализаторам для нефтепереработки развивается и с вводом каталитического производства «Газпром нефти» ключевые импортные позиции будут закрыты, то доля импорта основных нефтехимических катализаторов (полимеризации олефинов, окисления и других) остается на уровне 100%. На данный момент проекты по локализации их производства находятся на самых начальных стадиях. Развитие в России химических производств, в первую очередь крупнотоннажных производств

полиолефинов, будет не только стимулировать спрос на катализаторы в этих сегментах, но и мотивировать российских производителей к созданию собственных катализаторных решений.

Текущая ситуация с санкционным давлением создает как трудности для российской химии и нефтепереработки, так и возможности для данных отраслей по локализации внутри страны тех компетенций, которые ранее импортировались из-за рубежа. От успеха в реализации данных планов будет зависеть и дальнейшее развитие российской химии и нефтепереработки.

Выводы

- Катализаторы используются в большинстве процессов современной промышленности: в нефтепереработке и нефтехимии, в пищевой и фармацевтической промышленности, в утилизации отходов, очистке отходящих газов и во множестве других направлений промышленного производства.
- Развитие промышленности, выстраивание новых технологических цепочек, внедрение новых процессов в химической индустрии невозможны без использования широкой номенклатуры каталитических систем.
- Рост геополитической напряженности в 2022 году привел к формированию рекордного уровня санкционного давления на российскую промышленность. Поставки катализаторов в Россию из ЕС были запрещены в рамках пятого пакета санкций. Кроме того, ряд компаний — поставщиков технологий и производителей катализаторов объявил о добровольном уходе с российского рынка. Это привело к тому, что российские компании утратили доступ к наиболее технологичным катализаторам, и актуализировало задачу по замещению ушедших с рынка поставщиков, в первую очередь за счет локализации аналогичных компетенций внутри страны.
- Разработка и развитие собственного производства катализаторов — наукоемкое направление мало- и среднетоннажной химии. Задача развития подобных производств лежит в плоскости глубокой коллаборации между бизнесом и научным сообществом, в планировании, проведении и имплементации результатов НИР и НИОКР в производство.
- Развитие импортонезависимых катализаторных производств требует локализации внутри страны не только научных компетенций, но и смежных производств широкой компонентной базы, используемой для синтеза каталитических материалов.

