

## ЦЕОЛИТЫ В КАТАЛИЗЕ: СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

А. А. КУБАСОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

### ZEOLITES IN CATALYSIS: TODAY AND TOMORROW

A. A. KUBASOV

*The usage of Zeolites which contain catalysts in two main processes of petrol refining (cracking and hydrocracking) is discussed. The abilities of Zeolites to be active catalysts in organic synthesis as well as to convert alcohols into hydrocarbons are shown.*

*Рассмотрено использование цеолитсодержащих катализаторов в двух основных процессах переработки нефти (крекинг и гидрокрекинг). Показаны возможности цеолитов ускорять реакции органического синтеза и превращения спиртов в углеводороды.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

В США и Европе в 90% процессов химической технологии используют катализ, и при этом получают 20–30% национального продукта. Вот почему в документах, определяющих перспективные направления исследований, ведущее место отводится катализу. Так, в одном из последних документов (<http://ourworld.ComputerServe.com/homepages/thevias/chemsy2.htm>) рекомендовано развивать исследования:

- по созданию катализаторов новых реакций: с осуществлением одновременно нескольких стадий, заменой минеральных кислот и  $AlCl_3$ , окислением различных органических соединений, для переработки альтернативного нефти сырья в углеводороды, что вызвано сокращением запасов нефти (кратность запасов нефти, то есть отношение запасов к извлекаемому в год количеству, по оценке XIII Всемирной энергетической конференции составляет 4 : 1), а также для уменьшения отходов и повышения безопасности производства;
- по разработке новых методик приготовления катализаторов, изучению процессов дезактивации катализаторов, использованию современных методов и технологий для создания новых катализаторов и определения механизма их действия: компьютерное моделирование и нанотехнология, что представляет собой фундаментальную задачу химии и физики поверхностных явлений.

Как наиболее важные направления в развитии научных основ катализа выделяют усовершенствование цеолитных катализаторов существующих процессов (крекинг, гидрокрекинг), получение синтетического топлива, обезвреживание  $NO_x$  и расширение круга проводимых процессов. К тому же адсорбционные и ионообменные свойства цеолитов позволяют эффективно использовать их в процессах очистки и в составе моющих средств, способных заменить фосфатные составляющие. Отсюда понятно, почему цеолиты и катализаторы на их основе интенсивно изучают и производят в огромных количествах. В 1998 году промышленно развитые страны произвели 906 тыс. т цеолитов для использования в составе моющих средств, 102 тыс. т для приготовления катализаторов (до 98% цеолитов Y и

ZSM-5 для крекинга и гидрокрекинга), 55 тыс. т сорбентов. Но стоимость катализаторов превышает стоимость других продуктов.

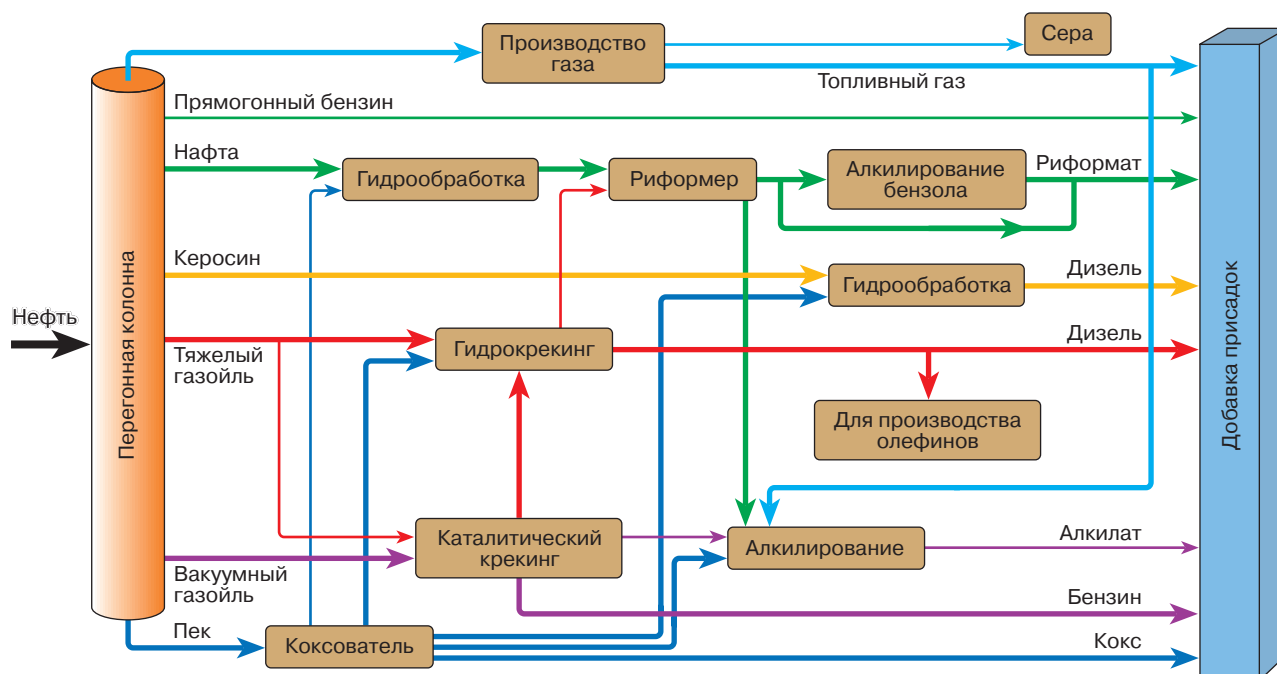
В статье [1] были рассмотрены особенности структуры цеолитов и их свойств. Предлагаемый материал дает обзор наиболее важных технологических процессов с использованием цеолитных катализаторов, а также новых результатов по использованию цеолитов в различных синтезах.

## ЦЕОЛИТНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ В ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ

Обезвоженное и освобожденное от солей и механических примесей сырье подвергают перегонке при атмосферном давлении (рис. 1). Продуктами являются газы (кипение до 30°C), легкая (до 105°C) и тяжелая (до 157°C) нефтя, керосин (до 232°C), легкий (до 343°C) и тяжелый (до 426°C) газойли, мазут (до 551°C) и гудрон (выше 560°C). Относительное содержание этих фракций и их состав зависят от типа месторождения нефти. Хотя нефть при атмосферном давлении без разложения можно нагреть до 430°C, перегонку обычно прекращают при 350°C, а остаток подвергают вакуумной перегонке. В нефти всегда присутствуют S-, N- и O-содержащие соединения, а также металлы (Na, V, Fe, Ni и другие, чаще в комплексе с порфиринами). Поскольку эти примеси снижают активность катализаторов, перед

проведением крекинга (не всегда) и гидрокрекинга для их удаления сырье предварительно подвергают гидроочистке – каталитической обработке  $H_2$  под давлением.

**Каталитический крекинг.** Рассмотрим каталитический крекинг – самый многотоннажный промышленный химический процесс. Сырьем служат фракции, кипящие при  $>360^\circ C$ . Процесс проводят в реакторе высотой 30–35 м (или в нескольких реакторах высотой по 10 м) при 450–520°C и атмосферном или повышенном давлении (до 0,4 МПа). При этом протекают крекинг парафинов и нафтенов до олефинов и парафинов, изомеризация, деалкилирование, расщепление боковых цепей и перераспределение алкильной группы ароматических соединений, диспропорционирование олефинов, перераспределение водорода, полимеризация и конденсация, коксообразование – образование полиалкилароматических соединений и графитоподобных агломератов. Продуктами при общей степени превращения ~70% являются газ (до 20%), бензин (до 50–60% с октановым числом (ОЧ) до 80), легкий и тяжелый газойли (до 30%). Эти показатели зависят от типа сырья, катализатора и режима процесса. Установлено, что все процессы начинаются атакой протона структурных гидроксильных групп катализатора молекулой углеводорода, в результате чего образуются карбокатионы. Присоединение протона к олефину приводит к образованию иона карбения, несущего положитель-



**Рис. 1.** Общая схема переработки нефти

ный заряд и способного быстро расщепляться или изомеризоваться. Именно способность к изомеризации объясняет то, что бензин каталитического крекинга имеет высокое ОЧ. Природа взаимодействия насыщенных углеводородов с протоно-донорными центрами служит еще предметом дискуссии. Ранее считали, что сначала парафин превращается на катализаторе в олефин и далее происходит крекинг. Сейчас предполагают, что сильные кислотные центры цеолитов воздействуют на парафины аналогично суперкислоте, образуя ион карбония. Причем во всех моделях обязательным является полный перенос протона. Достаточно образования комплекса углеводород–протон с частичным переносом заряда.

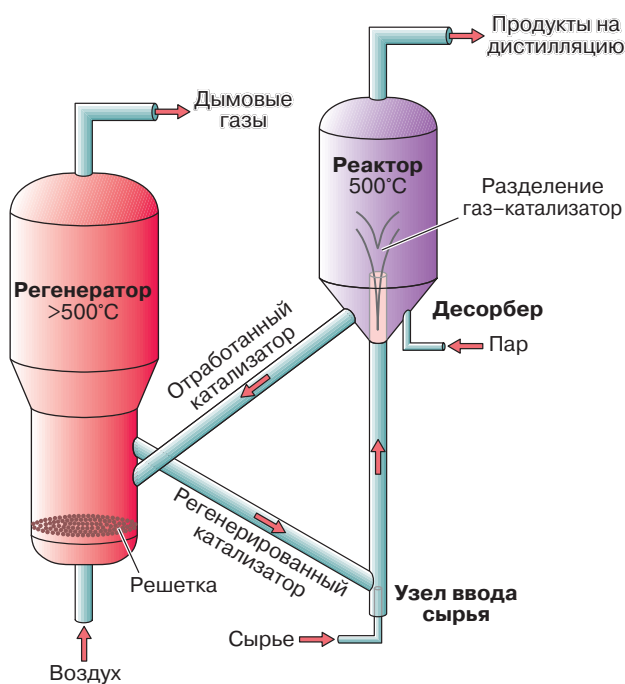
До 60-х годов катализаторами были аморфные алюмосиликаты, а с 1962 года начато внедрение цеолитов, поскольку они способны более полно и селективно перерабатывать нефтяное сырье. Для приготовления цеолита как компонента катализатора проводят замещение ионов  $\text{Na}^+$  в цеолите Y на ионы  $\text{NH}_4^+$  (с целью создания кислотных центров при последующем прокаливании) и/или обмен на ионы редкоземельных элементов (РЗЭ). Во все большей степени цеолит используют в ультрастабильной форме (USY). Однако цеолит явля-

ется лишь основой катализатора. В первых катализаторах было 8–12% цеолита. Совершенствование технологии позволило повысить его содержание до 20–30%, и возможно дальнейшее увеличение. Окончательный состав промышленного катализатора определяется особенностями технологии, что вызывает необходимость более подробно обсудить схему современной установки каталитического крекинга (рис. 2, а, б).

Процесс проводят в лифт-реакторах, в которые сырье и катализатор обычно поступают снизу, а продукты вместе с катализатором удаляются сверху. Для обеспечения потока и равномерного перемешивания катализатор должен иметь малый размер частиц. Изготавливают микросферические частицы, средний диаметр которых составляет 60 мкм. Частицы размером до 40 и свыше 105 мкм удаляют, так как слишком малые частицы будут уноситься из реактора, а крупные не обладают прочностью, достаточной для избежания истирания в потоке. За счет протекающих одновременно с крекингом процессов полимеризации образуется кокс и катализатор теряет активность, поэтому время пребывания в реакторе ограничено секундами. На выходе катализатор отделяется от смеси углеводородов, и после обработки водяным паром для удаления более легко летучей



а



б

**Рис. 2.** а – установка каталитического крекинга; б – схема реактора каталитического крекинга

части полимерных отложений поступает в регенератор, в котором при 650–670°C в атмосфере воздуха проводят выжигание кокса, а выделяющееся при этом тепло используют для нагрева сырья.

Рассмотрим, каким образом при создании промышленного катализатора учитывают требования, предъявляемые технологией. Катализатор должен быть активным, чтобы увеличить количество бензина. Но слишком большая активность одновременно может увеличить образование газа и кокса, а это, помимо потери ценного сырья, ведет к тому, что при регенерации выделяется большое количество тепла и кристаллическая структура цеолита может разрушиться. Для отвода тепла от цеолита в состав катализатора вводят аморфный алюмосиликат – матрицу. В самом реакторе матрица обеспечивает транспорт сырья к цеолиту, что определяет использование широкопористых алюмосиликатов, обеспечивающих одновременно равномерное распределение кокса. Кроме того, аморфный алюмосиликат увеличивает прочность микросферы. Для повышения коэффициента скольжения частиц (предотвращение истирания) их поверхность покрывают солями бария или другими модификаторами. Как уже отмечалось, в десорбере проводят обработку водяным паром. Для повышения стабильности к пару вводят катионы РЗЭ и используют USY. Чтобы обеспечить замкнутый поток катализатора в цикле реактор–регенератор, удаление кокса (может быть до 5% сырья, но ограничивают 0,8–1,0%) в регенераторе должно произойти достаточно быстро. Для этого в катализатор добавляют переходные металлы, увеличивающие скорость и полноту окисления до CO<sub>2</sub>. Поскольку в сырье после гидроочистки все-таки остаются малые примеси металлов, дезактивирующих цеолитный компонент, требуется повысить стойкость к ним. Для этого добавляют пассиваторы – соединения Sb, P, Sn, В, реагирующих с примесями. Благодаря этому катализаторы способны не терять заметно активность в присутствии до 0,2 мол. % Ni и до 0,3 мол. % особенно вредного V. Для уменьшения выбросов оксидов S и N также вводят специальные добавки.

Каталитический крекинг имеет два варианта: преимущественное получение бензина (США) или котельного топлива и олефинов для нефтехимического синтеза (Европа и Япония). Для повышения выхода легких олефинов (для получения полипропилена) в катализатор включают ZSM-5. Это уменьшает крекингую активность, но превращение n-парафинов в узких порах пентасила повышает выход изо-углеводородов. Поэтому сейчас около 50% установок в Европе и на Среднем Востоке используют добавки ZSM-5.

Задачей разработок по созданию новых катализаторов является обеспечение максимального выхода целевого продукта (бензина или нефтехимического сы-

рья) при образовании минимального количества кокса, сгорание которого в регенераторе обеспечивает энергией технологический процесс.

**Гидрокрекинг** – второй по объему производимой продукции и использованию цеолитов процесс, продуктами которого являются бензин, легкие углеводороды, дизельное и реактивное топлива. Часть продуктов поступает на установки каталитического крекинга. Сырьем для гидрокрекинга служит в основном вакуумный газойль (поскольку в этой фракции содержание вредных примесей выше, чем в сырье крекинга, здесь обязательна стадия гидроочистки). Процесс проводят под давлением H<sub>2</sub> (5–30 МПа) при 350–450°C с неподвижным слоем катализатора. Поэтому требования к механической прочности менее жесткие.

Основные реакции гидрокрекинга – образование карбкатиона, его превращения (изомеризация, крекинг) и гидрирование непредельных продуктов. Понятно, что, за исключением гидрирования, реакции близки по механизмам к крекингу, то есть эти стадии ускоряются кислотными центрами. В качестве кислотной основы используют аморфные алюмосиликаты, морденит и чаще цеолит Y (или USY), ионы Na, в которых примерно поровну замещены на протоны и катионы РЗЭ. Гидрирование требует введения металлов. В качестве гидрирующего компонента раньше использовали Pt (от 0,01 до 6%), а сейчас применяют более дешевые композиции, например сочетание оксидов Co и Mo (до 30%). Содержание оксидов определяется типом сырья, режимом процесса и целевыми продуктами.

Для повышения крекинговой способности катализаторы часто предварительно сульфидируют высокотемпературной обработкой H<sub>2</sub>S или тиофеном. При этом образуются дополнительные протоно-донорные центры. Для обеспечения механической прочности, равномерного распределения микрокристаллов цеолита, подвода и отвода вещества и тепла в состав катализатора вводят аморфные оксид алюминия или алюмосиликат. Ассортимент катализаторов гидрокрекинга широк, но, к сожалению, детально влияние различных компонентов на общие свойства катализатора еще не изучено, хотя некоторые корреляции уже очевидны. Так, в совместных работах химического факультета МГУ и Института нефтехимического синтеза РАН показано, что активностью и селективностью катализаторов гидрокрекинга управляет кислотная составляющая катализатора. Оптимизация состава катализатора остается актуальной научной задачей.

Создание катализаторов часто является высоким искусством, но основанным на научных разработках.



### КОНВЕРСИЯ СПИРТОВ В УГЛЕВОДОРОДЫ

В начале 70-х годов в связи с нефтяным кризисом были развернуты исследования по созданию технологии переработки спиртов в углеводороды, поскольку способы получения метанола из угля или природного газа, а также этанола из биомассы хорошо отработаны. Дегидратация спиртов может дать углеводороды с числом атомов углерода большим, чем в исходном спирте (получение дивинила). Однако на фожазитах, в основном из-за геометрии большой полости, продукты дегидратации легко полимеризуются и активность катализатора падает. Проблема была решена после того, как синтезировали пентасил.

При дегидратации метанола на кислотных центрах пентасила первой стадией является получение диметилового эфира, который до 300°C остается основным продуктом. При 350–400°C происходит дальнейшая потеря воды с получением этилена и пропилена, которые в последующих реакциях полимеризации и изомеризации образуют широкий набор олефинов, парафинов и алкилароматических соединений; их содержание зависит от условий проведения процесса. Так, при дегидратации этанола на цеолите HZSM-5 при 375°C при степени превращения более 99% получают около 37% воды и 63% углеводородов (около 58% газы вплоть до C<sub>4</sub> и 42% фракции C<sub>5</sub> и выше, в том числе и алкилароматические углеводороды). Наиболее полное превращение спирта (до 100%) достигается при соотношении Si/Al от 19 до 27.

Повышение температуры увеличивает содержание ароматических соединений и легких олефинов. Повышение давления также увеличивает выход ароматических соединений. Введение в цеолит катионов Mg, Zn может изменить диаметр каналов и тем самым изменить селективность. На выход влияет и устройство реактора. Так, в реакторе с кипящим слоем катализатора (Германия) получают больше олефинов, а с неподвижным слоем (Новая Зеландия) — больше бензина, то есть, изменяя состав катализатора и условия, можно целенаправленно влиять на состав получаемых продуктов. Но в настоящее время процесс не представляется экономически выгодным и только приблизительно 1% бензина получают этим методом. Однако в Новой Зеландии таким способом производят до 720 тыс. т бензина в год, что удовлетворяет около трети потребности страны, а часть продукции даже экспортируется. Но для получения ароматических углеводородов и проведения различных синтезов, подробно рассмотренных в [5], конверсия метанола представляет интерес уже сейчас, в частности и потому, что в продуктах крекинга на цеолитах Y содержание олефинов мало.

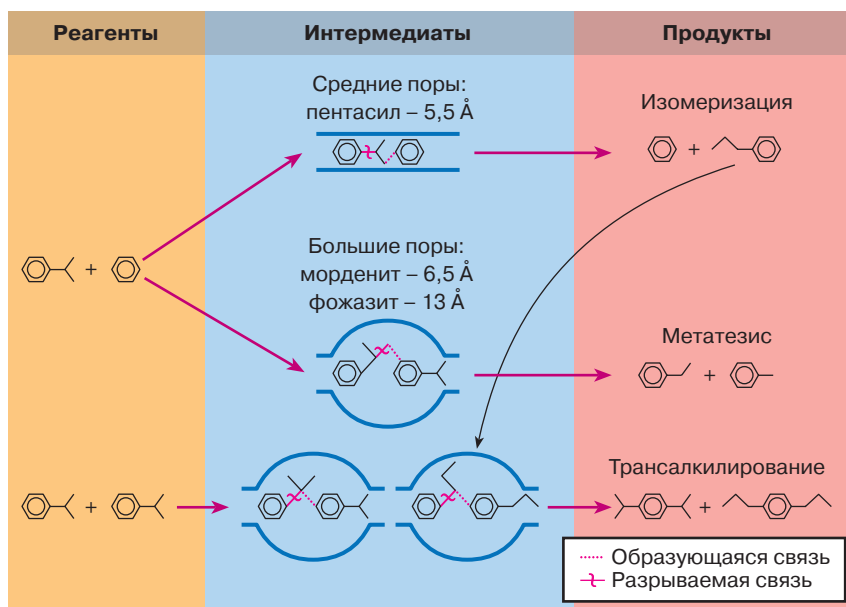
### СИНТЕЗЫ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕОЛИТОВ

После того как были синтезированы разнообразные структуры, обладающие порами, образуемыми кольцами из 6, 8, 9, 10, 12, 14, 18, 20 тетраэдрических атомов, диаметр которых может достигать 1,5–5,0 нм, стало возможным использовать цеолиты для разнообразных синтезов. Известно, что одна из основных особенностей цеолита — проявление ситовых эффектов. Это выражается в том, что реагент не попадает в поры катализатора (селективность по реагенту) или не образуется определенное промежуточное соединение (селективность по интермедиату). Если же затруднена диффузия продукта из пор, то он претерпевает дальнейшее превращение (селективность по продукту).

Рассмотрим результаты работы, выполненной на химическом факультете МГУ (рис. 3). Изучение превращения изопропилбензола, н-пропилбензола и бензола методом ЯМР показало, что в узких порах пентасила образуется линейный интермедиат (верхний путь на рис. 3), что приводит к изомеризации 94% продуктов. В широких порах морденита и фожазита становится возможным образование более объемных интермедиатов, превращение которых дает продукты метатезиса (28% на мордените и 36% на фожазите) или трансалкилирования (40 и 50%), а при изомеризации — 32 и 14%. Существен также и размер кристаллов, определяющий длину диффузионного пути, то есть время контакта с активными центрами и отношение скоростей превращения и диффузии.

**Синтез высокооктановых добавок к бензину.** Бензин каталитического крекинга хотя и имеет высокое ОЧ (~80), но для использования в современных двигателях его улучшают, добавляя соединения с большим ОЧ. Эти добавки получают изомеризацией н-парафинов, алкилированием изобутана бутиленом и в более сложных синтезах. Для алкилирования обычно используют кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или HF, что нежелательно. Сейчас разработан метод получения алкилата с высокой селективностью и выходом, близким к теоретическому, на цеолите бета (HBEA), аналогичном по структуре пентасилам. Высоким ОЧ обладает метил-*трет*-бутиловый эфир (117). Получают его изомеризацией бутена в изобутен на ферьерите и затем взаимодействием с метанолом на ZSM-5 и 22. Используют и метилизобутилкетон, получаемый из ацетилен и H<sub>2</sub> на Pt-HZSM-5.

**Органические синтезы.** Практически невозможно привести все реакции, ускоряемые цеолитами, поэтому перечислим только некоторые разработки последнего времени. Синтез изопропилбензола, полупродукта для получения фенола, ацетона и α-метилстирола, проводят алкилированием бензола пропиленом с AlCl<sub>3</sub>



**Рис. 3.** Молекулярно-ситовое действие цеолитных катализаторов в химических реакциях

или  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Эти неудобные катализаторы можно заменить цеолитом бета (до 93% конверсии с высокой селективностью). Более узкие каналы цеолита бета препятствуют получению молекул диалкилбензолов, образование которых на фожазите делает его непригодным. Цеолиты способны быть активными и селективными катализаторами гидратации и дегидратации, гидролиза. Нанесение металлов делает цеолиты катализаторами окислительно-восстановительных процессов. Дегидроенизацию  $\alpha$ -лимонена (получение *n*-цимола) проводят на ZSM-5 и Y с нанесенным Pd. А MoMCM-41 стабилен и активен в окислении циклогексанола и циклогексена  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Титанзамещенные цеолиты (морденит, бета, Y, пентасилы) активны в жидкофазном окислении спиртов, циклогексена, а MoY – в окислительном аминировании толуола. Цеолиты могут быть и катализаторами полимеризации – стирол на Y- и бета-цеолитах.

На цеолитах разрабатывают способы синтеза, позволяющие сочетать воздействие разных способов управления химическими процессами. Так, на BaY и CaY проводят фотохимическое окисление пропана  $\text{O}_2$  в ацетон со степенью превращения >50% без образования побочных продуктов. А этан на CaY селективно и полно фотохимически окисляется в ацетальдегид.

**Химия C1.** Одна из наиболее актуальных проблем – связывание распространенных, но инертных соединений, содержащих один атом углерода. И здесь использование цеолитов представляет широкие возможности. На цеолите с сульфидами Mo, Cr, W с высоким выходом

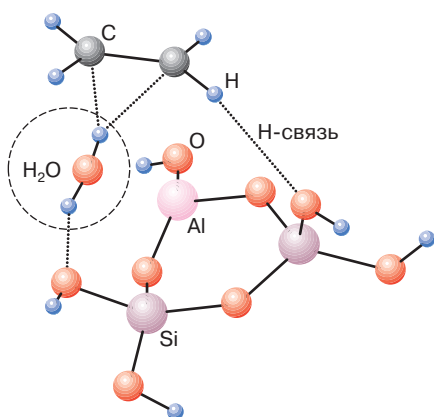
получают этан и этилен из метана. Дальнейшее использование углеводородов C2 представляет меньшие трудности. Так, например, на GaZSM-5 при 520°C этилен можно на 70% превратить в ароматические соединения, а комбинация  $\text{MoO}_3/\text{HZSM-5}$  с  $\text{La}_2\text{O}_3$  позволяет непосредственно превращать метан в стирол при 1023 K.

**Нейтрализация вредных газов.** Одной из серьезных проблем является нейтрализация выхлопов двигателей, дымовых газов, причем если дожиг CO осуществить просто, то восстановление оксидов азота до  $\text{N}_2$  представляет сложную задачу. Перспективным оказалось нанесение Fe или Cu на пентасилы с ионами P3Э: почти 90%  $\text{NO}_x$  превращается в  $\text{N}_2$  при 350°C.

## НОВЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Нанесение металлов.** При создании бифункциональных катализаторов не всегда выгодно равномерное распределение металла по объему. Образование частиц на внешней поверхности в некоторых случаях дает более активный катализатор. Так, в гидрогенолизе бутана Ir, распределенный в объеме NaY, менее активен и селективен (53% этана), чем на внешней поверхности (83%), где образуются более крупные и активные микрорекристаллиты Ir.

**Кластеры и комплексы в структуре цеолитов.** Широкие возможности создает синтез кластеров металла (нанотехнология) или синтез комплекса непосредственно в полостях структуры цеолита. Восстановлением



**Рис. 4.** Комплекс фрагмент цеолита–вода–этилен

комплексов Rh в полостях NaX получены октаэдрические кластеры, активные в гидрировании толуола. В промышленности уже используют цеолиты с кластерами Pt при селективном получении ароматических соединений из нефти. Бипиридиновый комплекс Mn в цеолите Al-MCM-41 оказался более активным в окислении стирола или 2,6-ди-*трет*-бутилфенола в хинон, чем гомогенные катализаторы.

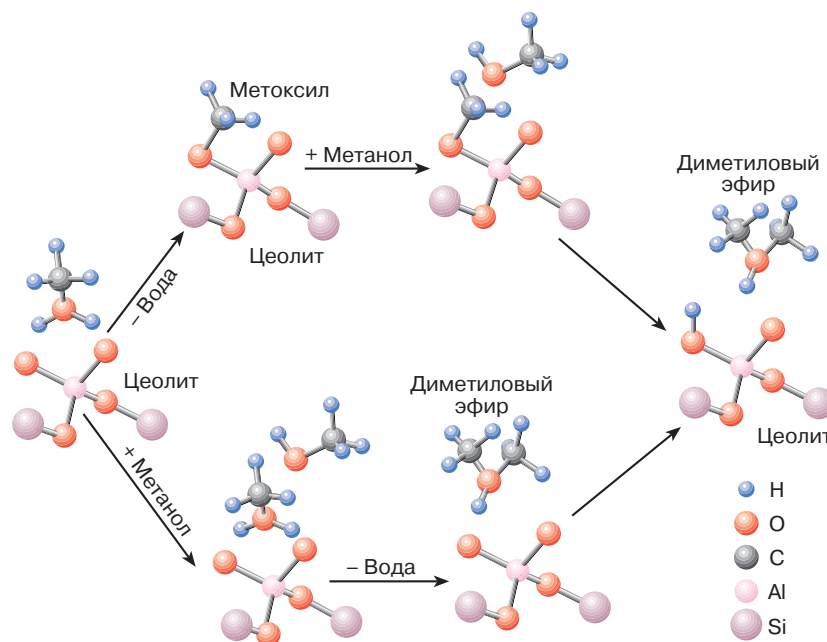
**Цеолитные мембраны.** Цеолиты позволяют создавать системы, обладающие свойствами мембран, способных пропускать только определенные вещества. Це-

олит ZSM-5, нанесенный в виде пленки (40–500 мк) на  $Al_2O_3$ , эффективно разделяет смеси н-бутан – изобутан.

**Цеолиты и ферменты.** Небезынтересным является использование цеолитов как моделей ферментативных катализаторов. До сих пор непонятно, почему в живом организме используются только левые формы аминокислот. Одна из гипотез заключается в том, что начало жизни связано с их образованием в цеолитах. В Антарктиде найден органофильный цеолит *mutinaite*, очевидно имеющий хиральную структуру каналов, что приводит к образованию L-аминокислот. Внедрение сложных органических молекул в цеолиты может дать системы, аналогичные ферментам. Так, фталоцианин-цеолитные комплексы действуют подобно фосфолипидной мембране и при комнатной температуре скорость окисления алканов *трет*-бутилпероксидом на них сопоставима со скоростью ферментативного процесса. Подобные исследования открывают перспективу создания искусственных ферментов, способных проводить процессы при низких температурах и давлениях. Связывание  $N_2$  уже осуществили на цеолитах, содержащих родий.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Современная вычислительная техника позволила повторно использовать методы теоретической химии в решении научных проблем катализа. Начинается все с компьютерного синтеза. В Великобритании создана программа ZEBEDDE, позволяющая моделировать



**Рис. 5.** Схема превращения метанола на пентасиле

синтез новых цеолитов, обладающих заданными свойствами, что и происходит затем в опытах. Квантовохимические расчеты позволяют оценить изменения как в структуре цеолита (показано, например, что при адсорбции воды, аммиака, этилена происходит миграция ионов  $Ni^{2+}$  в более доступные места структуры фожазита, что ранее только предполагали), так и взаимодействующих с ним молекул. В качестве примера приведем оценку возможности переноса протона на углеводород, проведенную автором совместно с профессором Н.Ф. Степановым и другими коллегами при моделировании тройной системы цеолитный фрагмент–вода–аммиак (этилен). Было установлено, что вода, “адсорбированная” на трехкоординированном атоме Al цеолита, способна проявлять протоно-донорные свойства (передача протона на аммиак) и активировать этилен (рис. 4). Такие расчеты позволяют анализировать и предполагаемые механизмы превращения. Механизм дегидратации спиртов на цеолитах до сих пор достоверно не установлен. Моделирование взаимодействия метанола с фрагментом структуры цеолита показало, что вначале образуется поверхностное соединение, в котором молекула спирта связана водородной связью с ОН-группой цеолита (соединение А, рис. 5). Далее возможны: 1) отщепление с образованием поверхностной метоксильной группы и последующим образованием эфира. Верхний путь; 2) связанный водородной связью с цеолитом спирт присоединяет вторую молекулу и дает диметиловый эфир. Нижний путь. Расчеты показали, что более выгоден второй путь превращения.

Хотя понятна ограниченность моделей (нельзя ожидать, что малый фрагмент идентичен по свойствам

пространственной структуре), такие исследования позволяют более достоверно судить о механизмах поверхностных взаимодействий и целенаправленно проводить поиск новых катализаторов.

В статье автор хотел показать, что цеолиты – мощное средство, позволяющее управлять различными процессами технологии, и изучение цеолитов – фундаментальная область научных исследований, имеющая достаточно четкие задачи и перспективу не исчерпать себя даже в далеком будущем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кубасов А.А. Цеолиты – кипящие камни // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 7. С. 70–76.
2. Магарил Р.З. Теоретические основы химических процессов переработки нефти. М.: Химия, 1976. 311 с.
3. Суханов В.П. Каталитические процессы в нефтепереработке. М.: Химия, 1979. 343 с.
4. Крекинг нефтяных фракций на цеолитсодержащих катализаторах / Под ред. С.Н. Хаджиева. М.: Химия, 1982. 277 с.
5. Караханов Э.А. Синтез-газ как альтернатива нефти. II. Метанол и синтезы на его основе // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 12. С. 65–69.

*Рецензент статьи* Г.В. Лисичкин

\* \* \*

Алексей Алексеевич Кубасов, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии химического факультета МГУ. Область научных интересов – адсорбция и катализ на цеолитах, оптическая спектроскопия и квантовая химия поверхностных состояний, методология использования ЭВМ в учебном процессе и научных исследованиях. Автор и соавтор более 150 публикаций.