

COORDINATION
CATALYSIS
IN THE CHEMISTRY
OF UNSATURATED
COMPOUNDS

V. D. SHTEINGARTS

One of the most significant phenomena in modern organic chemistry is coordinative catalysis. The basic ideas of the nature of coordinative interaction of unsaturated organic compounds and transition metals stems from the understanding of the activation of reagents. This mechanism is the most important for catalytic reactions.

Статья посвящена одному из важнейших явлений современной органической химии – координационному катализу. Рассмотрены основные представления о природе координационного взаимодействия ненасыщенных органических соединений с переходными металлами и обусловленной им активации реагентов, а также механизм наиболее важных каталитических реакций.

© Штейнгарц В.Д., 1996

КООРДИНАЦИОННЫЙ КАТАЛИЗ В ХИМИИ НЕНАСЫЩЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. Д. ШТЕЙНГАРЦ

Новосибирский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

В 1911 году немецкий химик Вильштеттер сообщил, что, исходя из алкалоида псевдопельтьерина **1** (схема 1), выделенного из коры гранатового дерева, им получено неизвестное до того времени соединение состава C_8H_8 , имеющее структуру циклооктатетраена **2**. Выход конечного продукта в расчете на исходное соединение составил ~5%, что, между прочим, следует считать выдающимся достижением, если учесть, что представленная на схеме 1 цепочка превращений состоит из 12 стадий.

Сообщение Вильштеттера носило сенсационный характер. Во-первых, речь шла о структуре принципиально нового типа. Во-вторых, сведения о свойствах циклооктатетраена имели принципиальное значение для построения теоретической концепции ароматичности, поскольку в рамках классической структурной теории бензол и циклооктатетраен являются аналогами как циклически замкнутые последовательности чередующихся простых и двойных связей. На деле же оказалось, что они разительно различаются по своим свойствам. На этом основании была поставлена под сомнение формула Кекуле для бензола. Однако с меньшим основанием можно было ставить вопрос о достоверности вывода Вильштеттера о структуре полученного им соединения.

Спустя тридцать с лишним лет другой немецкий химик, Реппе, сообщил о синтезе циклооктатетраена из ацетилена в одну стадию с выходом 80% при участии в реакции цианистого никеля (схема 1). Свойства полученного им вещества совпали с описанными Вильштеттером, и тем самым снимались вопросы о структуре циклооктатетраена. Но разве при сопоставлении путей, которыми шли эти исследователи, не возникает мысль о том, что координационный катализ, использованный Реппе, действительно позволяет творить чудеса? Впрочем, наука занимается как раз тем, что демонстрирует обыкновенность чуда. В данном случае оно становится возможным благодаря тому, что молекулы ацетилена координируются с ионом никеля и, уже будучи лигандами, претерпевают превращения в его координационной сфере. Чтобы в общих чертах понять суть рассматриваемого явления, необходимо вооружиться некоторыми простыми качественными

Вильштеттер, 1911 г.

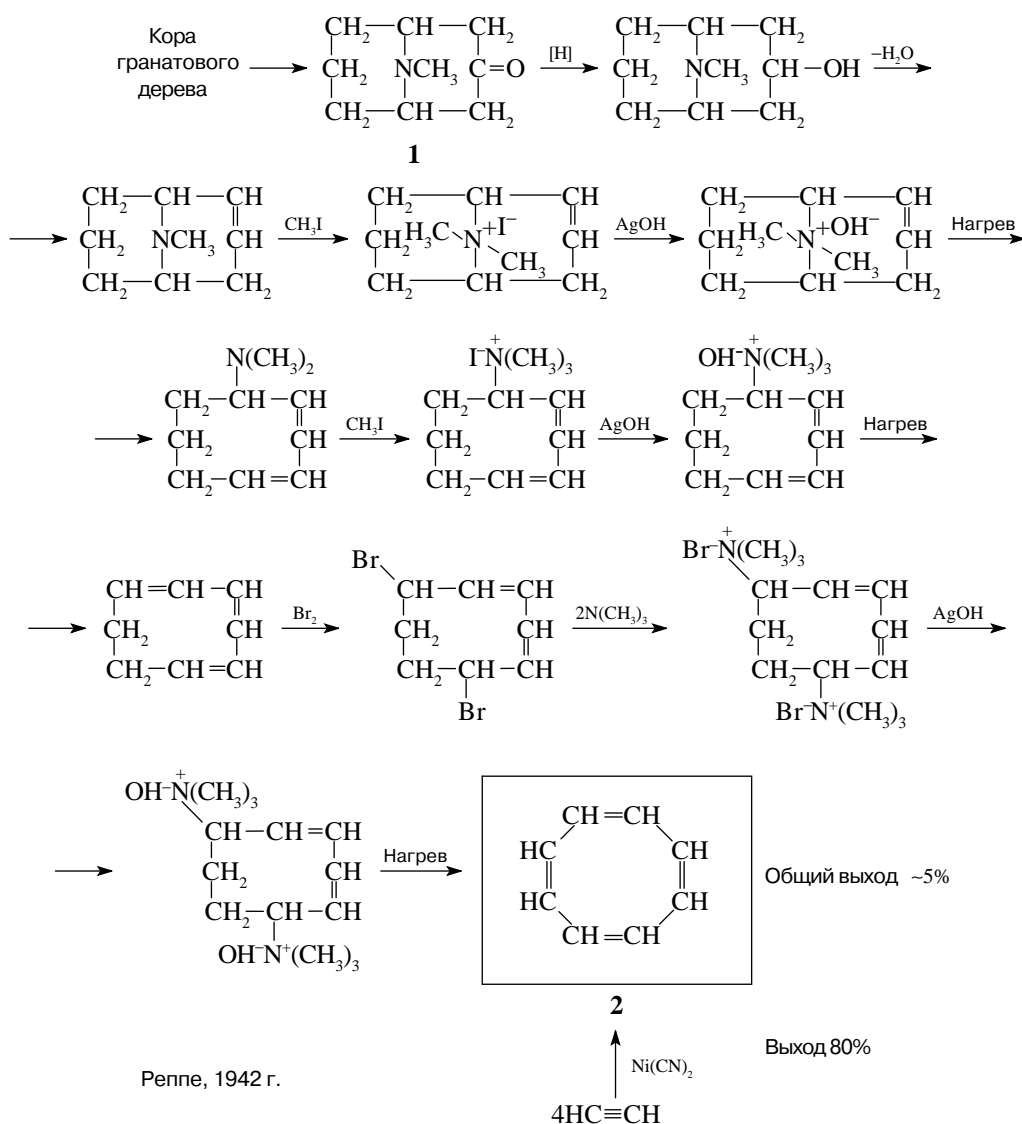


Схема 1. Синтез циклооктатетраена.

представлениями о природе взаимодействия, приводящего к образованию новой химической связи.

МОЛЕКУЛЯРНО-ОРБИТАЛЬНАЯ ТРАКТОВКА ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Читатель, несомненно, знаком с понятием атомной орбитали (АО) как состояния, которое предопределено законами квантовой механики для электрона, находящегося в поле атомного ядра. Это состояние в первую очередь характеризуется определенным значением энергии электрона и определенной конфигурацией области пространства около ядра, в которой электрон находится большую

часть времени. Теперь несложно перейти к понятию молекулярной орбитали (МО): нужно только эти представления перенести на ситуацию, когда электрон находится в поле нескольких ядер.

Если сохранить классическое представление о том, что молекулы формируются из атомов, то логично считать, что, когда это происходит, атомные орбитали объединяются и формируют молекулярные орбитали. Действительно, когда в молекуле электрон оказывается вблизи какого-либо ядра, он испытывает его влияние в большей степени, чем влияние более удаленных ядер, и в его окрестностях молекулярное состояние (МО) электрона в

известной степени напоминает его состояние в соответствующем этому ядру атоме (АО) до его вхождения в молекулу. Фигурально выражаясь, МО как бы склеены из определенных АО.

Это склеивание может быть представлено как результат перекрывания АО при сближении атомов на расстояние, соответствующее длине возникающей между ними связи. В простейшем случае молекулы водорода перекрываются $1s$ АО двух атомов водорода. Законы квантовой механики допускают два варианта их объединения, то есть две АО трансформируются в две МО (рис. 1). Каждая из них охватывает оба водородных ядра, а в области, примыкающей к какому-либо одному из ядер, напоминает $1s$ АО атома водорода. Основные различия между этими МО сводятся к следующему. Одной из них соответствует более низкая энергия электрона, чем та, которой он обладал, пребывая на АО до формирования МО. Поэтому переход двух электронов с АО изолированных атомов на эту МО означает стабилизацию электроно-ядерной системы, что и заставляет атомы удерживаться на расстоянии, обеспечивающем перекрывание их АО, то есть быть связанными. Второй МО, наоборот, соответствует более высокая энергия электрона, чем та, которой он обладал бы, оставаясь на АО. Поэтому, коль скоро на первой МО могут разместиться оба присутствующих в молекуле электрона, вторая является лишь вакансией, которая может реализоваться при электронном возбуждении молекулы или поступлении дополнительного электрона. Очевидно, что заполнение этой МО порождает тенденцию к удалению атомов друг от друга и, соответственно, “расщеплению” этой МО на АО изолированных атомов, что для находящегося на ней электрона сопровождалось бы понижением энергии. По этим причинам первая МО называется связывающей, а вторая – разрыхляющей.

Различие между этими двумя МО проявляется и в их пространственных конфигурациях. Связывающая МО не имеет разрыва в области перекрывания АО. В отличие от этого, характерной чертой разрыхляющей МО является наличие разрыва в области перекрывания: здесь линия, соединяющая ядра, пересекается перпендикулярной плоскостью, особенность которой заключается в том, что, хотя электрон бывает по обе стороны от нее (при этом волновая функция имеет противоположные знаки), вероятность обнаружить его непосредственно в этой плоскости равна нулю. Это узловая плоскость или, в общем случае, узловая поверхность – категория, известная нам по АО, имеющим главное квантовое число более 1. Эти пространственные характеристики или, иначе говоря, узловые свойства присущи любой МО, являющейся соответственно связывающей и разрыхляющей по отношению к конкретной паре соседних атомов.

Для связи между атомами более тяжелых элементов можно ограничиться рассмотрением перекрывания только между АО, относящимися к внешнему электронному уровню или валентной оболочке (граничные АО) с учетом их гибридизации. В соответствии с этим σ -связи, образуемые атомами углерода в молекулах органических соединений, формируются в результате перекрывания двух гибридных АО для связи С–С или гибридной АО углерода с $1s$ АО водорода для С–Н связи вдоль линии, соединяющей два ядра. Формирующиеся таким образом двухцентровые МО σ -связей на примере молекулы этана представлены на рис. 1. Нетрудно убедиться в том, что при всех различиях между ними, а также между ними, с одной стороны, и МО молекулы водорода, с другой, общие черты, присущие связывающим и разрыхляющим МО, присутствуют.

При переходе к π -связям существование описания сохраняется, а изменяется тип перекрывающихся АО (для углерода это $2p$ АО) и способ перекрывания. Теперь АО ориентированы перпендикулярно к линии, соединяющей ядра, и параллельно друг другу. При этом реализуется перекрывание не непосредственно по линии, соединяющей ядра, а по бокам от нее. Энергетический эффект при этом меньше, нежели при σ -перекрывании. Поэтому π -связь менее прочная, чем σ -связь (вследствие меньшего выигрыша в энергии при переходе электрона с АО на связывающую π -МО), и π -электроны легче возбуждаются (различие в энергиях связывающей и разрыхляющей π -МО меньше, чем для соответствующих σ -МО).

Однако π -МО далеко не всегда могут быть представлены как двухцентровые, то есть охватывающие только два ядра. В первую очередь это относится к молекулам с сопряженными π -электронными системами, которым в классических структурных формулах соответствуют фрагменты с чередующимися кратными и простыми связями. Простейшими примерами являются бутadiен-1,3 и бензол, π -МО которых представлены на рис. 2. Эти МО являются делокализованными, то есть охватывающими более чем два ядра. При этом среди них имеются МО, связывающие для молекулы в целом (π_2 для бутadiена, π_2 и π_3 для бензола), поскольку им соответствуют более низкие уровни энергии, чем для $2p$ АО, но по своим узловым свойствам связывающие для одних (отсутствует узловая плоскость, проходящая через область перекрывания АО) и разрыхляющие для других (линия, соединяющая ядра, пересекается узловой плоскостью) пар соседних атомов с преобладанием в целом связывания над разрыхлением. Соответственно имеются и разрыхляющие в целом π -МО (π_3 для бутadiена, π_4 и π_5 для бензола), но являющиеся связывающими для некоторых пар соседних атомов с преобладанием в целом разрыхления над связыванием.

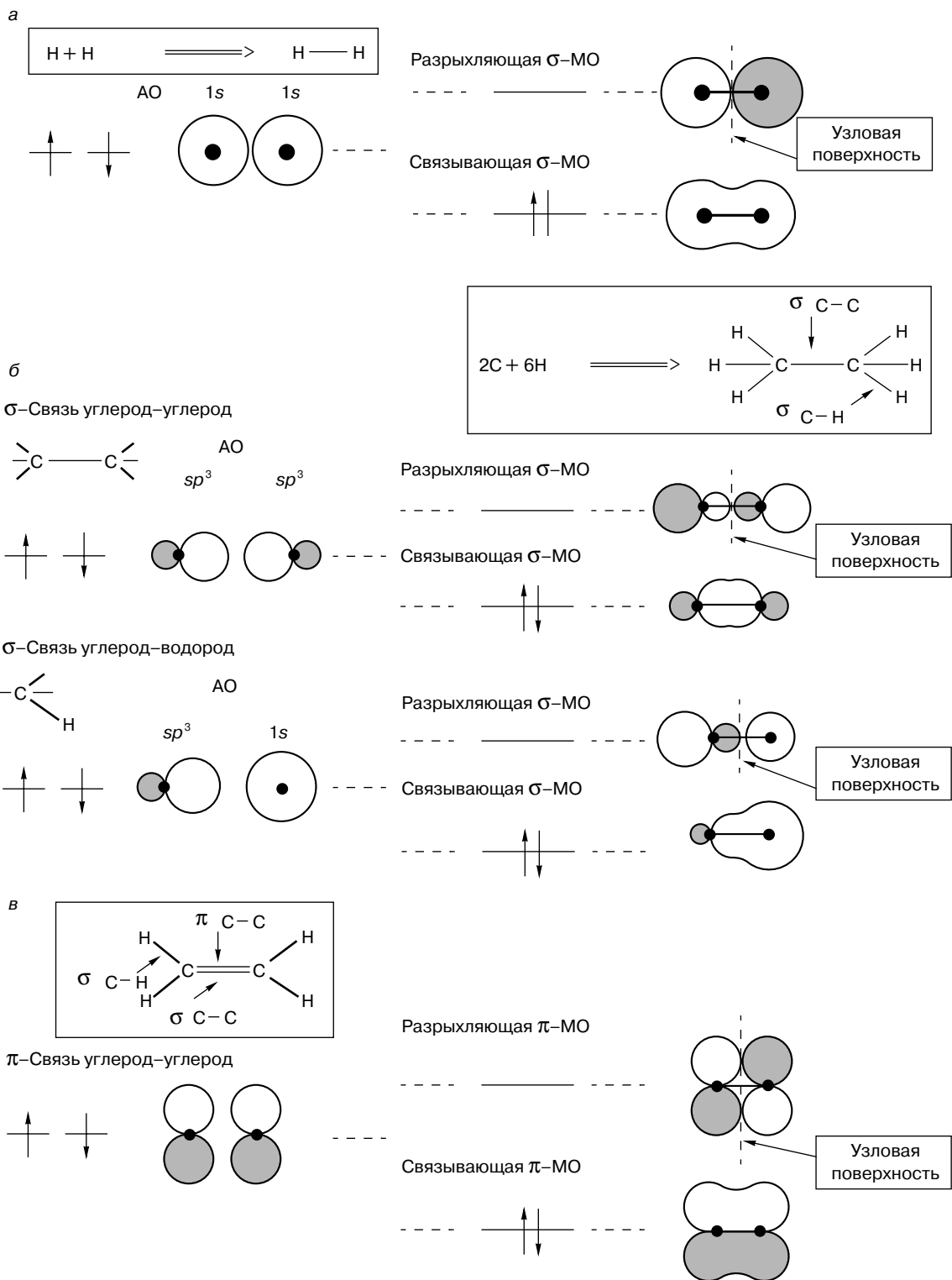


Рис. 1. Трансформация атомных орбиталей (АО) в молекулярные орбитали (МО). а – Молекулы водорода; б – молекулы этана; в – молекулы этилена (π -молекулярная орбиталь).

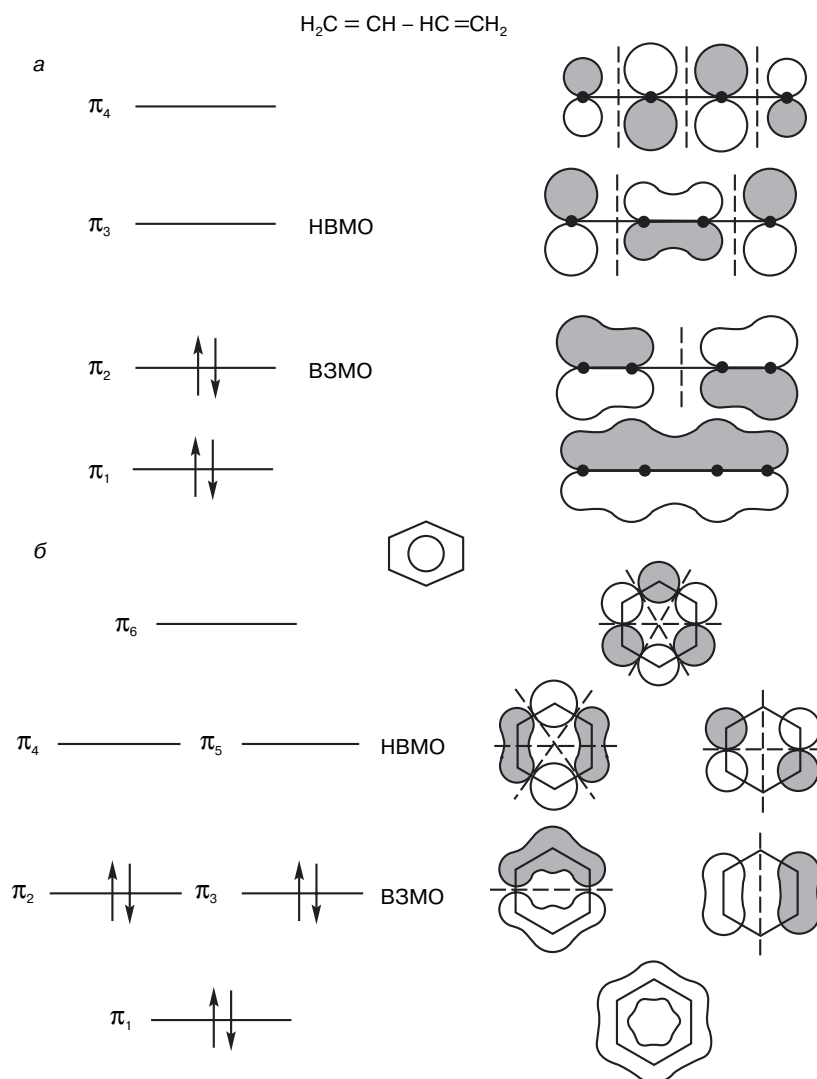


Рис. 2. Делокализованные π -молекулярные орбитали. *а* – 1,3-Бутадиена; *б* – бензола (ВЗМО – верхняя занятая молекулярная орбиталь; НВМО – нижняя вакантная молекулярная орбиталь).

Как же можно представить себе формирование новых связей в результате взаимодействия не атомов, а молекул? В принципе точно также, но теперь речь идет о сближении и такой взаимной ориентации реагирующих частиц, которая обеспечивает существенное и эффективное перекрывание их МО. Никакой принципиальной разницы в этом смысле между АО и МО нет. Система МО молекулы аналогична системе АО атома. Для качественного анализа картины взаимодействия молекул, как правило, можно рассматривать участие в нем только граничных МО – верхней занятой (ВЗМО) и нижней вакантной (НВМО). Участие последней обусловлено тем, что у большинства молекул имеется определенное количество заполненных, то есть содержащих пару электронов, МО, а МО с неспаренным элект-

роном нет. Поэтому для того, чтобы возникло связывание, ВЗМО одной молекулы должна перекрываться с НВМО другой. В результате их перекрывания, как и в случае АО, возникнут две новые комбинации – связывающая, энергия которой ниже, и разрыхляющая, энергия которой выше энергий обеих перекрывающихся МО реагентов (схема 2). Тогда два электрона с ВЗМО одной из взаимодействующих молекул (донора) перейдут на связывающую комбинацию с выигрышем энергии, что и создаст эффект связывания. Иными словами, взаимодействие двух МО должно быть двухэлектронным, а это означает, что участвующая в перекрывании МО второго реагента (акцептора) должна быть вакантной. В приближении граничных орбиталей это НВМО.

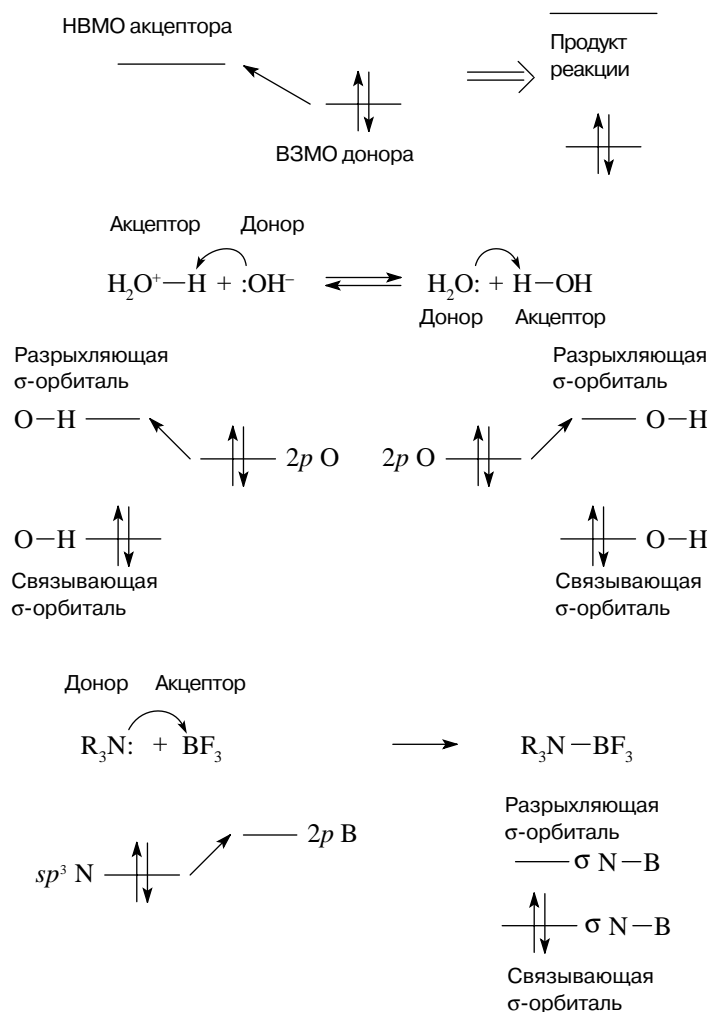


Схема 2. Формирование донорно-акцепторных связей при взаимодействии молекул.

Такой тип формирования новой связи может быть назван донорно-акцепторным. Он реализуется, например, при взаимодействии кислоты и основания. В одних случаях формирование новой связи сопровождается разрывом некоторых связей, присутствовавших в молекулах реагентов, как это происходит, например, при переносе протона от иона гидроксония к гидроксильному аниону (так же и в обратной реакции переноса протона от одной молекулы воды к другой) или от молекулы хлористого водорода к молекуле аммиака. В иных случаях образование новой связи не сопровождается разрывом старых связей, как это имеет место в реакции амина (донор) с трехфтористым бором (акцептор) (схема 2). Вооружившись этими качественными представлениями, мы можем попытаться понять, в чем секрет чуда координационного катализа.

РАЗРЕШЕНО ТО, ЧТО НЕ ЗАПРЕЩЕНО

В практическом смысле катализ позволяет осуществить реакции, которые в тех же условиях в отсутствие катализатора не реализуются. Можно сказать, что эти некаталитические реакции запрещены, и прежде всего следует разобраться в причинах этого запрета. Обратимся к реакции гидрирования алкенов. Граничными орбиталями алкена являются его связывающая и разрыхляющая π -МО (рис. 1). Двухэлектронными являются взаимодействия связывающей МО одного реагента и разрыхляющей другого. Таких взаимодействий два, однако нетрудно убедиться (рис. 3), что в обоих случаях перекрывание не является эффективным, так как связывающий эффект перекрывания в той части, где обе волновые функции имеют одинаковые знаки, гасится разрыхляющим эффектом перекрывания с противоположными знаками. Таким образом, перекрывание МО

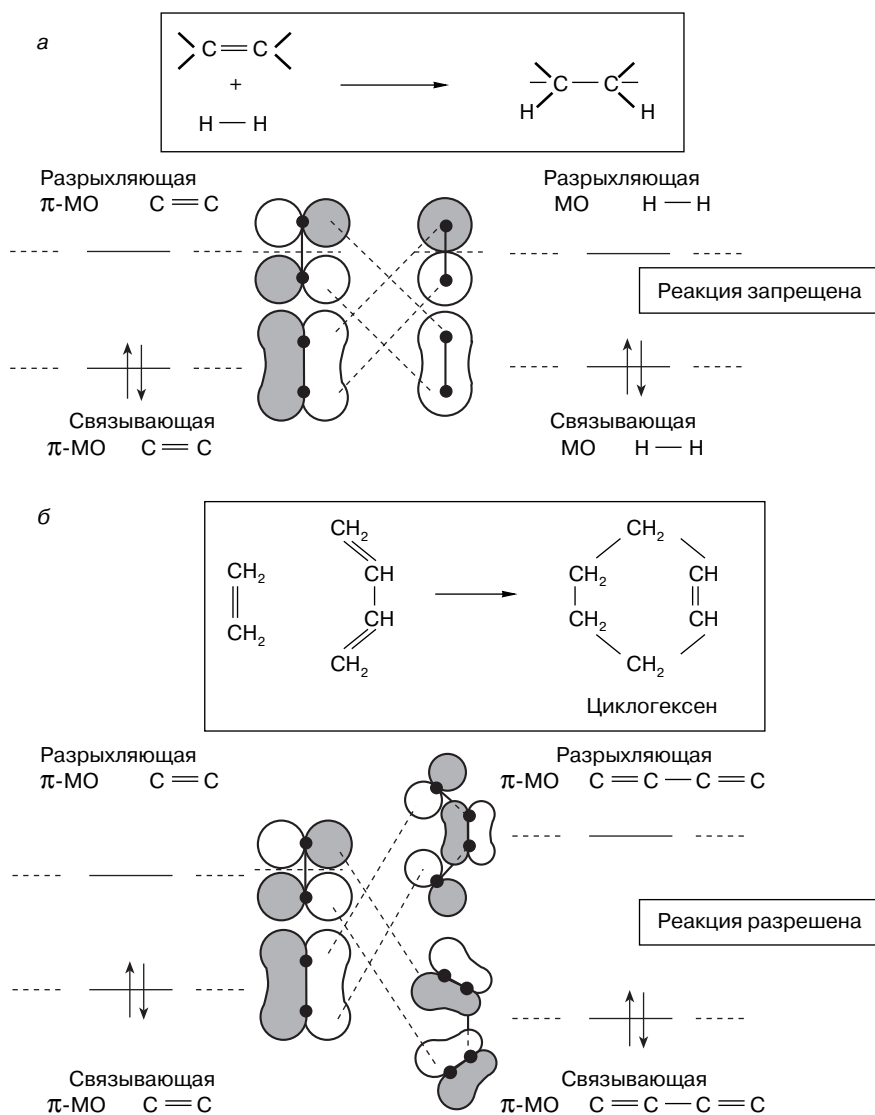


Рис. 3. Взаимодействие граничных молекулярных орбиталей. а – Этилена и водорода; б – этилена и бутадиена. Пунктирными линиями связаны перекрывающиеся доли молекулярных орбиталей.

не обеспечивает связывания при той взаимной ориентации молекул реагентов, которая требуется для реакции, или, другими словами, реакция запрещена по причине несовместимости их орбитальных симметрий.

В иных случаях такого запрета нет. В качестве примера можно привести присоединение алкена к концам фрагмента сопряженного диена (циклоприсоединение по типу 1,2 + 1,4) с образованием фрагмента циклогексена (диеновый синтез или реакция Дильса–Альдера). π -МО орбитали реагентов приведены на рис. 1 и 2 и нетрудно видеть, что для двухэлектронных взаимодействий их граничных МО при соответствующей взаимной ориентации запрета по симметрии нет (рис. 3). Таким образом, цикло-

присоединение типа 1,2 + 1,4 разрешено по орбитальной симметрии. Читатель может самостоятельно убедиться в том, что взаимодействие этих же молекул, но по типу циклоприсоединения 1,2 + 1,2, а также аналогичное взаимодействие двух молекул этилена с формированием циклобутанового фрагмента и взаимодействие двух молекул бутадиена по типу 1,4 + 1,4, запрещены по симметрии орбиталей.

КООРДИНАЦИЯ СНИМАЕТ ЗАПРЕТЫ

Как мы знаем, на поверхности некоторых металлов, таких, как Ni, Pd, Pt, водород энергично присоединяется к двойной связи. Алкены координируются с указанными металлами, стало быть, координация

снимает запрет по симметрии на взаимодействие алкена с водородом.

Эта координация по сути своей является взаимодействием атома металла с молекулой алкена с образованием более сложной молекулы комплекса металл–алкен. В соответствии со сказанным выше, оно может быть описано как перекрывание МО алкена с АО переходного металла с формированием новых, более сложных МО комплекса. Со стороны алкена в этом взаимодействии участвуют его граничные связывающая и разрыхляющая π -МО, а со стороны металла – d -АО. Пространственная конфигурация последних придает им возможность “подстраиваться” для перекрывания с самыми различными орбиталями так, чтобы при этом возник эффект связывания (рис. 4). Так, связывающая π -МО алкена может перекрываться с вакантной d -АО металла по линии, соединяющей централь-

ную точку двойной связи с ядром атома металла, что соответствует формированию σ -связи, а разрыхляющая π -МО алкена – с вакантной d -АО металла по одну и другую сторону от этой линии, что соответствует σ -связыванию. В результате этого возникают новые МО, относительная энергетика и конфигурация которых представлены на рис. 4.

А теперь так же, как это делалось выше для некоординированного алкена, посмотрим, существует ли запрет по симметрии для присоединения водорода к алкену, но уже не к свободному, а к координированному, входящему в состав комплекса в качестве лиганда. Для этого сопоставим узловые свойства граничных МО комплекса φ_2 и φ_3 и МО водорода с учетом того, что взаимодействия должны быть двухэлектронными. В ВЗМО φ_2 комплекса алкен входит своей разрыхляющей π -МО, а в НВМО φ_3 комплекса – своей связывающей π -МО. Таким

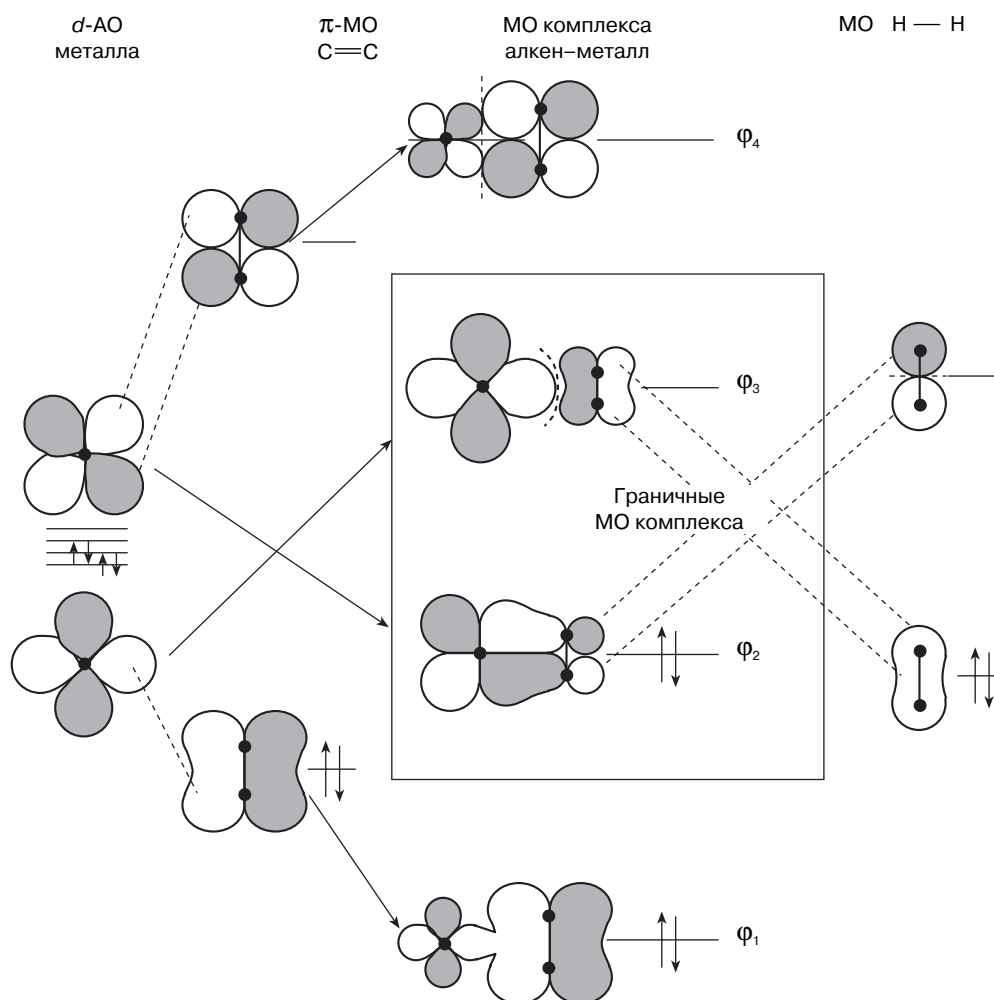


Рис. 4. Трансформация атомных орбиталей (показано стрелками) металла и граничных молекулярных орбиталей алкена в молекулярные орбитали комплекса металл–алкен и взаимодействие граничных молекулярных орбиталей комплекса и водорода. Пунктирными линиями связаны перекрывающиеся доли взаимодействующих орбиталей.

образом, в результате координации алкена с металлом его граничные МО как бы меняются ролями. Нетрудно убедиться, что это обеспечивает возможность эффективного перекрывания МО ϕ_2 и ϕ_3 со стороны, куда они обращены своими “алкеновыми” долями, соответственно, с разрыхляющей и связывающей МО водорода (рис. 4). Теперь запрета по симметрии для присоединения водорода нет.

Представленное выше описание координации в отношении снятия запрета по симметрии является весьма упрощенным. Но именно это делает картину наглядной и облегчает восприятие сущности дела. Оно отражает только часть того, что происходит в каталитической реакции — активацию алкена. На самом деле координационной активации подвергается и второй участник реакции — водород, что показано на схеме 3 на примере механизма гомогенного гидрирования алкенов в присутствии комплекса $\text{RhCl}(\text{PPh}_3)_3$ (Ph-радикал фенил, C_6H_5). В ней, кроме того, отражена главная отличительная черта механизма любой каталитической реакции — его циклический характер. После завершения взаимодействий, происходящих в координационной сфере металла, лиганд, соответствующий конечному продукту, в данном случае алкану, выходит из координационной сферы и уступает место исходному соединению, после чего все повторяется. В любом каталитическом цикле можно выделить три фазы: вхождение молекул реагентов в координационную сферу, взаимодействие лигандов в координационной сфере с формированием в конечном счете лиганда, соответствующего продукту реакции, и выход его из комплекса либо в результате диссоциации последнего, либо путем вытеснения исходным соединением.

Чем быстрее “прокручивается” каталитический цикл, тем эффективнее катализатор и, соответственно, тем меньше его требуется для того, чтобы каталитическая реакция протекала с приемлемой скоростью. В результате протекания побочных реакций катализатор может дезактивироваться. Это может происходить из-за того, что вакансию в координационной сфере металла занимает какой-то иной лиганд, более прочно связывающийся с металлом, чем исходное соединение, но не имеющий отношения к превращению последнего в продукт реакции. Поэтому металлокомплексные катализаторы весьма чувствительны к присутствию примесей, являющихся такими лигандами, и выступающих поэтому в качестве каталитических ядов.

Многочисленные каталитические реакции различаются не только природой реагентов и, соответственно, продуктов, в которые они превращаются, но и тем, какие конкретно превращения происходят в каждой из упомянутых выше фаз каталитического цикла. Все это заставляет нас ограничиться рассмотрением лишь небольшого числа примеров.

В органической химии особое значение придается реакциям, в которых формируется углерод-углеродная связь, ибо создание нового углеродного остова является наиболее важной задачей, решаемой в органическом синтезе. Широко известно, какое большое практическое значение имеет реакция полимеризация ненасыщенных соединений — этилена, пропилена, стирола, бутадиена и изопрена, хлористого винила и хлоропрена, метилметакрилата и многих других. Эта реакция всегда включает начальную фазу, которая по существу является переводом мономера в некое активированное состояние. Часто полимеризация одного и того же мономера может быть осуществлена с использованием различных способов активации, что влечет за собой различие в условиях проведения реакции и структурных характеристиках, а стало быть, и в свойствах образующегося полимера.

И здесь, например, в процессах получения полиэтилена, полипропилена, синтетического каучука, в полной мере проявляется высокая эффективность координационной активации, реализующейся при использовании металлокомплексных катализаторов. Их типичным представителем является так называемый катализатор Циглера–Натта — композиция, возникающая в результате взаимодействия четыреххлористого титана TiCl_4 и триэтилалюминия $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$. На схеме 3 приведен каталитический цикл координационной полимеризации этилена, в котором можно различить упомянутые выше три основные фазы. То, что происходит во второй фазе, включающей процессы, происходящие в координационной сфере, может быть названо внедрением одного лиганда в связь металла с другим лигандом. Трансформация координационной сферы по этому типу характерна для широкого круга каталитических процессов и, по существу, определяет результат реакции.

Другим важнейшим типом каталитических превращений ненасыщенных соединений, осуществляемых в широких масштабах в промышленности, является присоединение по кратной углерод-углеродной связи окиси углерода и какого-либо реагента типа HY (схема 3). Из соединений с тройной связью при $\text{Y} = \text{H}$ (гидроформилирование или “оксосинтез”) образуются ненасыщенные альдегиды (акролеин из ацетилена), при $\text{Y} = \text{OH}$, OR и др. — соответственно, ненасыщенные карбоновые кислоты (из ацетилена — акриловая, из метилацетилена — метакриловая) и их производные. Многие из этих соединений используются как мономеры для получения полимеров с функциональными группами. Эта же реакция, но с участием алкенов, приводит к насыщенным аналогам указанных продуктов. В приведенном на схеме 3 каталитическом цикле реакции присоединения к алкину CO и RON можно видеть два примера внутрисферных превращений указанного типа — внедрение алкина в связь металла с атомом водорода и вслед за этим внедрение

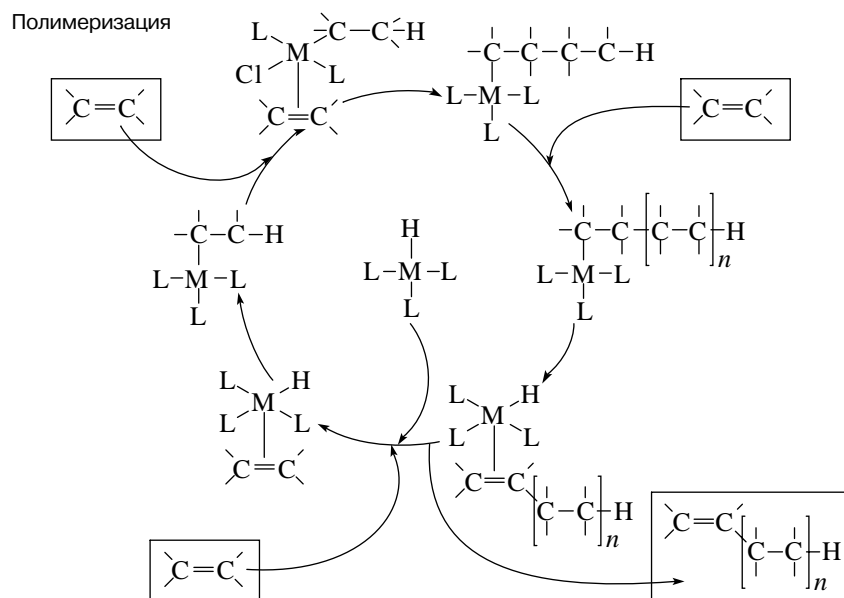
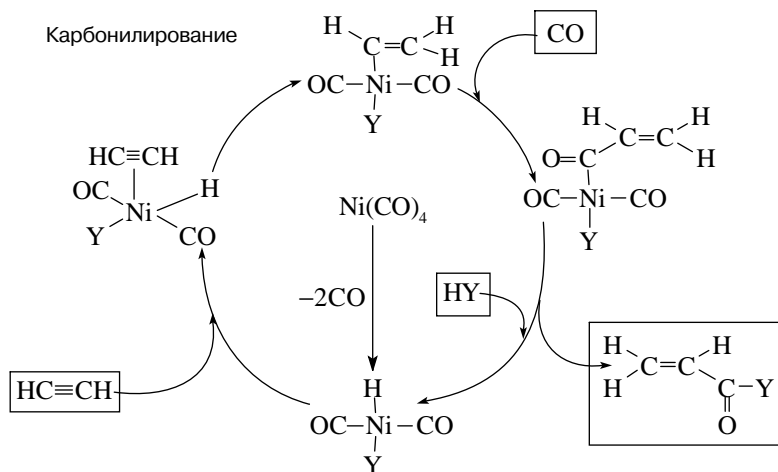
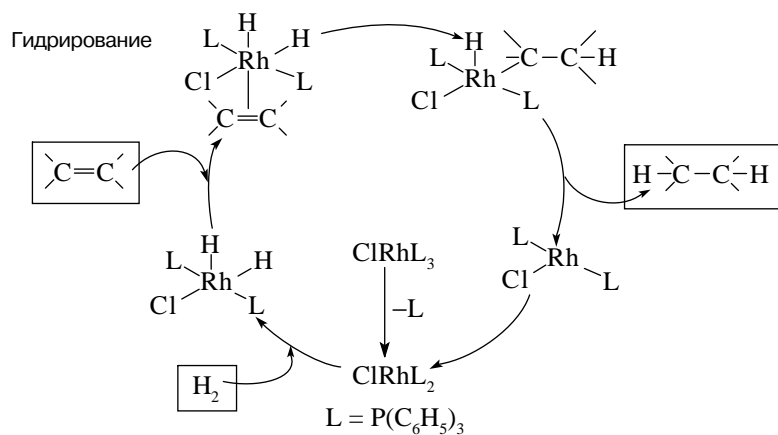


Схема 3. Каталитический цикл.

окиси углерода в связь металла с алкенильным лигандом.

Впечатляющими являются каталитические синтезы, в которых из малых ненасыщенных молекул в результате их циклической полимеризации возникают сложные циклические структуры. К их числу относится и упомянутый в начале статьи синтез циклооктатетраена **2** из ацетилена. Общим в предложенных для реакций этого типа схемах механизма является вхождение молекул полимеризующегося соединения в координационную сферу металла, в которой формируются углерод-углеродные связи между лигандами и возникают более сложные ненасыщенные системы. Однако в деталях эти схемы могут различаться в зависимости от природы мономера, металла и степени его окисления, сопутствующих лигандов. Например, один из вариантов механизма циклополимеризации ацетилена включает возникновение по ходу реакции комплексов, в которых металл связан с полимерным лигандом по его концам, что позволяет рассматривать такой комплекс как металлоциклическое соединение. Реакция завершается тем, что в этот цикл вместо атома металла встраивается еще одна молекула мономера, и образовавшийся циклополимер выходит из координационной сферы металла. Вслед за этим координационные вакансии металла занимают новые молекулы мономера и начинается следующий каталитический цикл (схема 4).

Циклополимеризация ацетилена является ярким примером того, насколько специфично действие металлокомплексных катализаторов. Стоит из-

менить природу сопутствующих металлу лигандов, заменив цианистый никель на комплекс $Ni(CO)_2$, $[P(C_6H_5)_3]_2$, и в реакции вместо циклооктатетраена с высоким выходом образуется бензол. Обращает на себя внимание присутствие в качестве лиганда трифенилфосфина $P(C_6H_5)_3$, который весьма прочно связывается с атомом никеля. Очевидно, по этой причине в координационной сфере металла может разместиться меньшее число ацетиленовых лигандов, чем в случае цианистого никеля, что и приводит к образованию цикла меньшего размера (схема 4).

Высокая специфичность действия металлокомплексных катализаторов ярко иллюстрируется реакциями циклополимеризации бутадиена (схема 4), которые осуществляются при использовании широкого круга комплексов никеля, хрома, титана. В зависимости от металла и природы сопутствующих лигандов можно получить циклоокта-1,5-диен **3** в результате циклодимеризации бутадиена по типу 1,4+1,4 (поскольку выше было сказано, что такая реакция для некоординированного диена запрещена по симметрии МО, мы имеем еще один пример того, что координация снимает указанный запрет), циклододека-1,5,9-триен, который к тому же может образовываться в различных пространственных конфигурациях (**4**, **5**, **6**), а также ряда других ненасыщенных циклических соединений.

И уж совсем поразительные превращения происходят в реакции метатезиса алкенов под влиянием комплексов молибдена, вольфрама и других металлов. В этих превращениях молекулы алкенов как бы “разрезаются” по месту двойной связи с

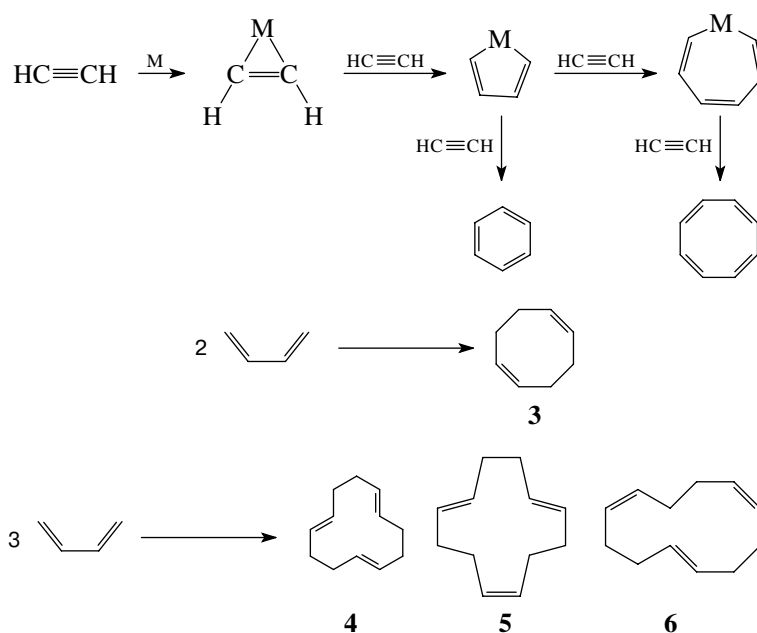


Схема 4. Циклополимеризация.

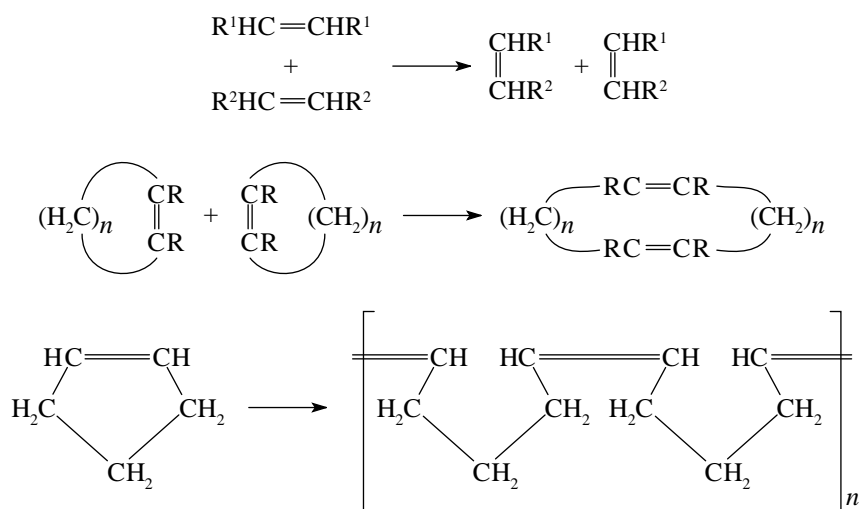


Схема 5. Метатезис алкенов.

образованием фрагментов, которые снова “сшиваются”, но в новых разнообразных комбинациях (схема 5). Применительно к циклическим алкенам это может приводить либо к циклодиенам с удвоенным размером цикла по отношению к исходному соединению, либо, с раскрытием цикла, к полимерному полиену.

Если читатель впервые познакомился с предметом данной статьи, то ее прочтение может быть сопоставлено с первым краткосрочным посещением экзотической страны. Вполне возможно, что полученные при этом впечатления породят желание познакомиться с ней более обстоятельно. В этом случае имеет смысл обратиться к книгам, представленным в приведенном ниже списке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цудзи Д. Органические синтезы с участием комплексов переходных металлов. М.: Химия, 1979.
2. Хенрици-Оливэ Г., Оливэ С. Координация и катализ. М.: Мир, 1980.
3. Накамура А., Цуцуи М. Принципы и применение гомогенного катализа. М.: Мир, 1983.
4. Мастерс К. Гомогенный катализ переходными металлами. М.: Мир, 1983.

* * *

Виталий Давидович Штейнгарц, доктор химических наук, профессор, зав. лабораторией изучения нуклеофильных и ионрадикальных реакций Института органической химии СО РАН, зав. кафедрой органической химии Новосибирского государственного университета, лауреат Ленинской премии. Автор более 250 научных статей и 1 монографии.