

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РЕАКЦИЯХ СОГЛАСОВАННОГО ЦИКЛОПРИСОЕДИНЕНИЯ

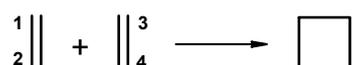
Предлагаемый материал включает краткое изложение истории появления теории сохранения орбитальной симметрии, простейшее толкование так называемых правил Вудворда—Гоффмана, а также ряд ярких примеров согласованного циклоприсоединения, нашедших практическое применение не только в лабораторном, но и в промышленном масштабе. В статье приведена полезная таблица с различными типами классификации реакций согласованного циклоприсоединения.

В ряду разнообразных химических процессов циклоприсоединение занимает выдающееся место по своему значению как для синтеза, так и в теоретическом плане. Эта реакция явилась наиболее универсальным методом получения различных карбо- и гетероциклических систем. Достаточно упомянуть такие широко известные реакции, как взаимодействие карбенов с кратными связями, диеновый синтез, реакции 1,3-диполярного циклоприсоединения и т. д. Многочисленные дискуссии, посвященные обсуждению их механизмов, в свое время во многих случаях выявили неприменимость представлений, обычно используемых для объяснения закономерностей гетеролитических и радикальных реакций, что привело к рождению термина «реакции без механизма». Сложившаяся ситуация стимулировала интенсивные теоретические исследования в этой области и создание теории сохранения орбитальной симметрии. Согласно этой теории, обсуждаемые процессы трактуются как согласованные многоцентровые реакции, протекающие в одну стадию (в предельном случае — синхронно) без промежуточного образования частиц ионного или радикального характера. Это был настоящий революционный переворот в теоретической органической химии, позволивший объяснить тонкости механизма множества реакций, давно завоевавших широкую популярность в синтетической практике не только лабораторного, но и промышленного масштаба.

Обсуждаемые согласованные, или одностадийные, процессы протекают без промежуточных интермедиатов, но в ходе взаимодействия реагентов происходит перераспределение электронов в многоцентровом переходном состоянии. Авторы созданной теории — Вудворд и Гоффман — ввели для их описания термин *перциклические реакции*, т. е. реакции, «в которых все изменения пер-

вого порядка, касающиеся химических связей, происходят согласованно по замкнутой кривой» [1, 2, 3]. Согласно определению ИЮПАК, это такие реакции, в которых согласованная реорганизация связей происходит через циклическую последовательность непрерывно связанных атомов. Следовательно, их можно рассматривать как реакции, происходящие через полностью сопряженное циклическое переходное состояние. Этот термин охватывает не только циклоприсоединение, но и хелетропные реакции (одновременное образование или одновременный разрыв двух связей у одного и того же реакционного центра), электроциклические реакции, сигматропные перегруппировки.

Теория согласованного циклоприсоединения, а также и обратного процесса — цикloreверсии — подразумевает, что такие процессы происходят в одну стадию с более или менее одновременным образованием (или разрывом) нескольких связей, в которых участвуют несколько (а не два, как привычно) реакционных центра, т. е. это — многоцентровые процессы. Так, к примеру, в образовании циклобутана из двух молекул этилена «задействованы» сразу четыре реакционных центра. При этом сразу согласованно разрываются две π -связи между атомами 1-м и 2-м и — между 3-м и 4-м атомами, а также возникают две новые σ -связи: между 1-м и 3-м и 2-м и 4-м атомами. Процесс термодинамически выгоден, так как из двух π -связей образуются две σ -связи, более прочные.

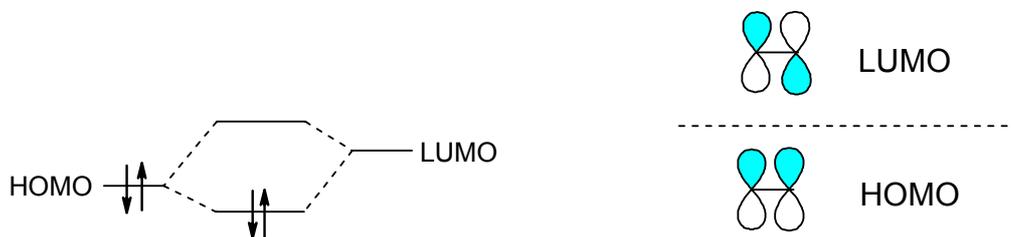


В таком многоцентровом процессе партнеры по взаимодействию должны быть очень строго ориентированы в пространстве для создания возможности максимального перекрытия взаимодействующих орбиталей, участвующих в формировании новых связей. Следовательно, свойства симметрии молекулярных орбиталей исходных реагентов должны играть в этих реакциях первостепенную роль. Значительны также и стерические факторы — ведь несколько реакционных центров для успешного перекрытия взаимодействующих орбиталей должны находиться на определенном и достаточно близком расстоянии. Так что для согласованных процессов характерны высокие отрицательные значения энтропии и небольшие положительные значения энтальпии.

Исторически закономерности обсуждаемых реакций, так называемые правила Вудворда—Гоффмана, были выведены ими на основании анализа корреляционных диаграмм молекулярных орбиталей (МО), участвующих в реакциях молекул, подразумевающих рассмотрение свойств и классификацию по элементам симметрии МО исходных реагентов и свойств симметрии МО, образующихся в результате циклоприсоединения продуктов реакции — циклоаддуктов [1, 2].

Однако эти правила можно вывести и другими способами, например, с помощью метода Мебиуса—Хюккеля, на основании теории граничных орбиталей и др. [4, 5]. Самым простым представляется подход на основании теории возмущения молекулярных орбиталей, в частности — на основании рассмотрения свойств симметрии ВЗМО и НСМО орбиталей взаимодействующих исходных соединений — субстрата и реагента, ибо взаимодействие между ними должно происходить путем перекрытия заполненных орбиталей субстрата с незаполненными (пустыми) орбиталями реагента (или наоборот). При этом воз-

никают две новые орбитали — связывающая и антисвязывающая (разрыхляющая):



Результатом взаимодействия является стабилизация заполненных орбиталей. Для реализации циклоприсоединения взаимодействующие орбитали должны обладать одинаковой симметрией, а сила взаимодействия будет тем больше, чем ближе друг к другу граничные, или фронтальные (т.е. взаимодействующие ВЗМО и НСМО).

Если симметрия орбиталей такова, что ВЗМО субстрата может перекрываться с НСМО реагента, то реакция осуществляется как согласованный процесс, т. е. она разрешена по симметрии. Если орбитали имеют симметрию, не подходящую для эффективного перекрывания, то реализация взаимодействия запрещена по симметрии. (Напомним, что для создания связей, для связывания, перекрываться должны доли орбиталей, имеющие один и тот же знак, т. е. положительные доли должны перекрываться с положительными или отрицательные — с отрицательными.)

Таким образом, метод граничных орбиталей так формулирует принцип сохранения орбитальной симметрии. Реакции разрешены, если при взаимодействии высшей занятой МО одного реагента и низшей свободной МО другого реагента перекрываются только доли одного знака: положительная — с положительной, отрицательная — с отрицательной.

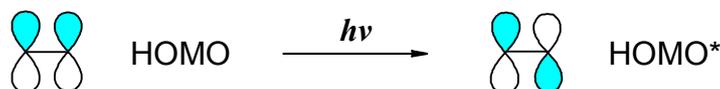
Следовательно, согласованная циклизация этиленов с образованием циклобутана в основном состоянии не идет (другими словами — запрещена). Поясним это подробнее.

Согласно теории ВМО (возмущения молекулярных орбиталей), для оценки возможности протекания согласованных реакций необходимо учитывать все попарные взаимодействия занятых и незанятых молекулярных орбиталей (МО). Однако, очевидно, что основной вклад в энергию возмущения должны вносить взаимодействия высших занятых МО (ВЗМО) и низших вакантных, или свободных, МО (НСМО) реагентов, так как они ближе всего друг к другу по энергии (вот почему их и называют фронтальными, или граничными). Приближение будет тем точнее, чем ближе по энергии ВЗМО и НСМО.

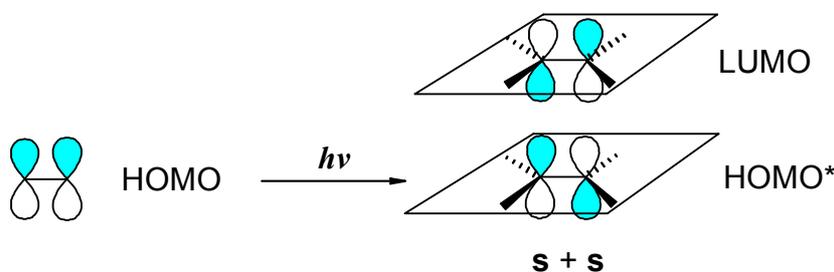
Участвующая в димеризации этилена НСМО имеет узел, поэтому знаки волновой функции у двух атомов углерода будут противоположными. Это приведет к тому, что суммарное понижение энергии при взаимодействии ВЗМО и НСМО орбиталей будет равно 0 и, следовательно, согласованный процесс будет запрещен.

При облучении одна из реагирующих молекул переходит в электронно-возбужденное состояние и в этом возбужденном состоянии может вступать во

взаимодействие с другой молекулой, находящейся в основном состоянии. Напомним, что при возбуждении один из электронов (находящийся на верхней занятой орбитали) переходит с ВЗМО на свободную орбиталь, поэтому при возбуждении ВЗМО будет иметь такой вид:



Так что в этом случае граничные орбитали теперь должны иметь одинаковую симметрию. В результате их взаимодействия энергия возмущения оказывается значительной, и циклизация в условиях фотохимического проведения реакции должна идти как согласованный процесс (эта реакция, как говорят, «разрешена» при фотолизе).



Таким образом, если общее число электронов $m+n$ во взаимодействующих реагентах, принимающих участие в циклоприсоединении, составляет $4q$, где $q = 1, 2, 3$ и т. д., и эти реагенты сближаются друг с другом лицом к лицу (т. е. как две плоскости, параллельные друг другу), иными словами — супра-супра-фациально, то такое взаимодействие разрешено (дозволено) с точки зрения теории сохранения орбитальной симметрии.

Следовательно, общие правила (правила отбора), которым подчиняются согласованные реакции циклоприсоединения, протекающие при супра-супрафациальном сближении реагентов, выглядят так:

Общее число электронов $\sum m + n$	Реакция разрешена	
	<i>в возбужденном состоянии</i>	<i>в основном состоянии</i>
$4q$ $q = 1, 2, 3, \dots$	+	-
$4q + 2$ $q = 0, 1, 2, 3, \dots$	-	+

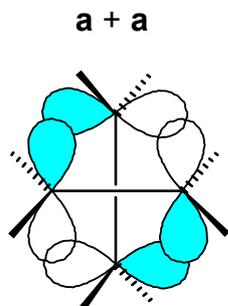
Циклоприсоединение такого типа протекает тоже эффективно, с хорошим выходом, если реагирующие молекулы сближаются антара-антарафациально (т. е. когда перекрывание орбиталей в одинаковых фазах возможно с «противоположной» стороны, например, при их выворачивании).

Термический контроль (т. е. проведение реакции между молекулами, находящимися в основном состоянии, что реализуется или при комнатной темпе-

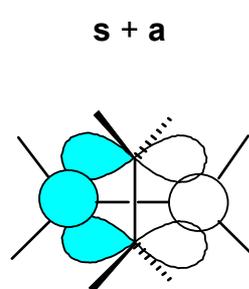
ратуре, или при нагревании реакционной смеси) возможен (иными словами — «разрешен») при супра-антара-сближении реагентов.

Для двух взаимодействующих молекул этилена описанные варианты сближения представляются таким образом:

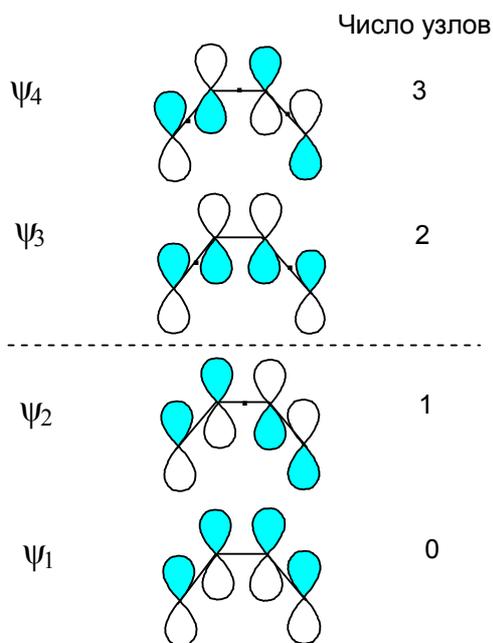
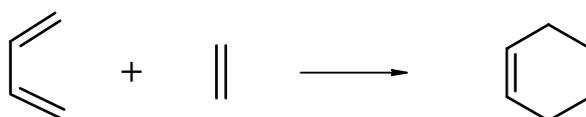
Антара-антара-подход

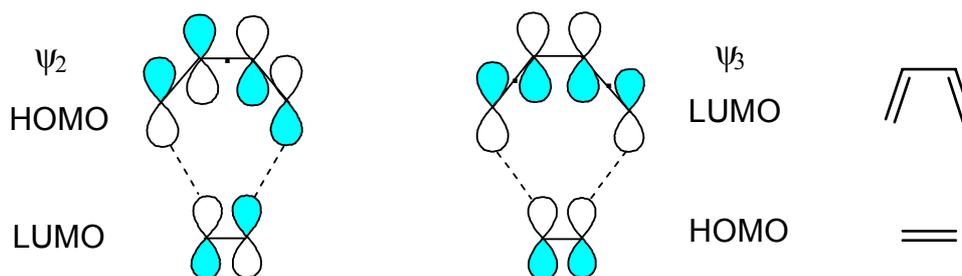


Супра-антара-сближение реагентов



На приведенных ниже рисунках показаны различные варианты сближения молекул этилена и бутадиена при их циклизации с образованием циклогексена. Их взаимодействие разрешено при термическом контроле — симметрия орбиталей, образующих новые связи, такова, что их эффективное «связывающее» перекрывание реализуется в основном состоянии реагентов:





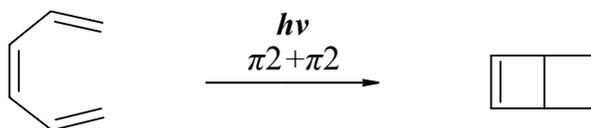
Итак, с учетом различных вариантов сближения реагентов можно представить правила Вудворда—Гоффмана в виде такой таблицы:

Общее число электронов $\sum m + n$	Реакция разрешена	
	<i>в возбужденном состоянии</i>	<i>в основном состоянии</i>
$4q$ $q = 1, 2, 3 \dots$	$m_s + n_s$	$m_s + n_a$
	$m_a + n_a$	$m_a + n_s$
$4q + 2$ $q = 0, 1, 2, 3 \dots$	$m_s + n_a$	$m_s + n_s$
	$m_a + n_s$	$m_a + n_a$

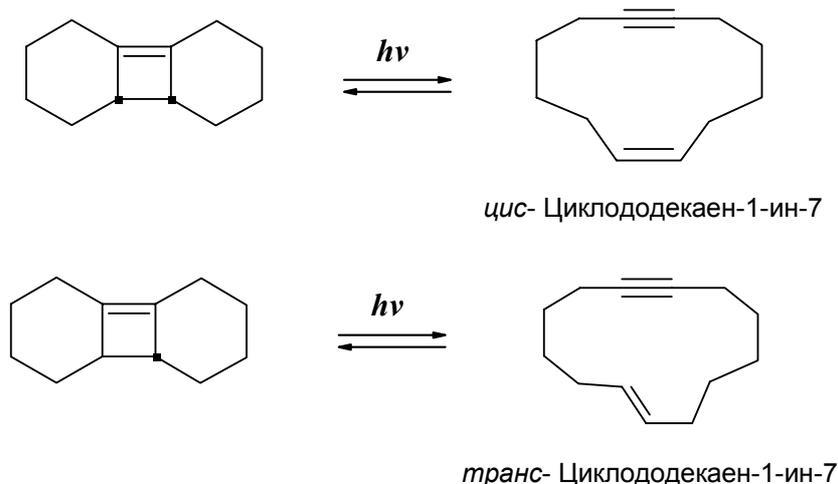
Таким образом, получивший широкое распространение подход к интерпретации процессов циклоприсоединения с точки зрения сохранения орбитальной симметрии позволяет заранее предопределять условия проведения такого типа реакций.

В принципе, этими правилами, разумеется, можно пользоваться, не осваивая способы их выведения. Однако нельзя забывать, что они применимы лишь к согласованным реакциям. (Напомним, что термин «согласованные» реакции более корректен, чем «синхронные», так как образование или разрыв связей в многоцентровых процессах происходит, конечно, не всегда одновременно: какая-то связь может образовываться чуть раньше другой или разрыв какой-то связи может чуть запаздывать, например, из-за влияния окружения молекулами растворителя.)

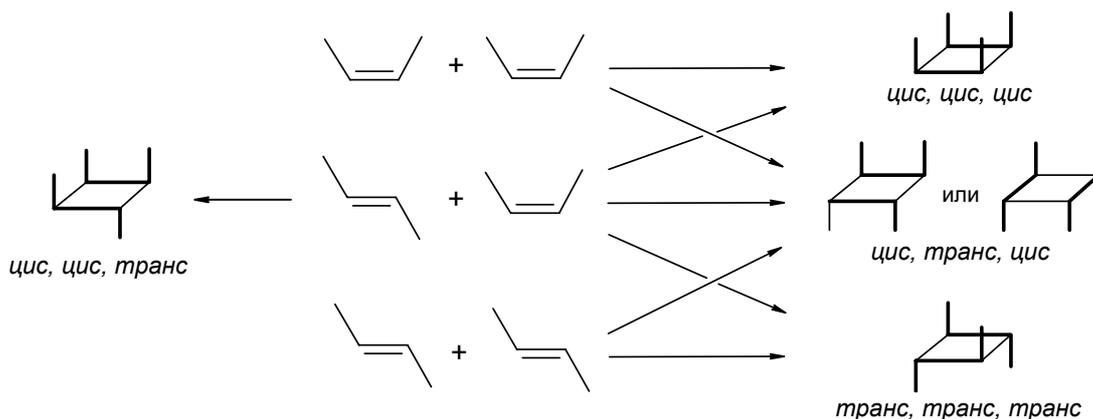
Если в циклоприсоединении принимают участие не все кратные связи полиеновой системы, тогда можно учитывать лишь электроны тех фрагментов, которые непосредственно задействованы в образовании новых связей. Например, превращение гексатриена в бицикло-[2.2.0]-гексен можно рассматривать как [2+2]-циклоприсоединение.



Выведенные правила применимы и к обратным процессам — к цикloreверсии. Для таких согласованных реакций также характерно сохранение стереохимии, что наблюдалось в приведенных ниже примерах образования циклододекаен-1-ина-7 с сохранением геометрии субстрата.



Стереоспецифичность считается одним из признаков согласованных реакций. Наглядной иллюстрацией этому служит разрешенная с точки зрения теории сохранения симметрии МО фотоиндуцированная циклизация в жидкой фазе *цис*- и *транс*-бутенов (по отдельности и в смеси), что демонстрирует следующая схема:



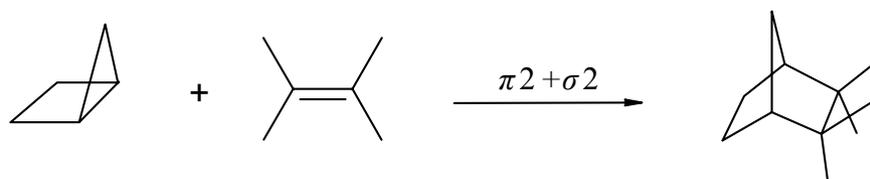
Как видно, *цис,цис,цис*-циклоаддукт может образоваться и из *цис*-бутена и из смеси *цис*- и *транс*-бутенов. *Транс,транс,транс*-циклоаддукт получается из *транс*-бутена или из смеси изомеров. *Цис,транс,цис*-циклоаддукт может быть получен и из чистого *цис*-бутена, и из *транс*-бутена, и из их смеси. А вот *цис,цис,транс*-циклобутан может быть синтезирован только при взаимодействии одной молекулы олефина *цис*-конфигурации и одной молекулы *транс*-конфигурации.

Приведенные результаты показывают, что геометрическая конфигурация возбужденных 2-бутенов сохраняется от момента поглощения света до завершения циклодимеризации, которая поэтому и является стереоспецифичной. Во многих реакциях подобного сорта подразумевается промежуточное образование эксимеров, представляющих собой комплексы, состоящие из одной возбужденной молекулы и одной молекулы в основном состоянии. В тех случаях, ко-

гда в циклоприсоединении участвуют реагенты разных типов, эти промежуточные комплексы называются эксиплексами.

Таким образом, образование эксимеров и эксиплексов согласуется с теоретическими представлениями о том, что один из партнеров в реакции циклоприсоединения должен находиться в возбужденном состоянии.

В реакциях этого типа могут принимать участие не только π -электроны, но и σ -электроны:



Наиболее важными в синтетическом плане представляются процессы циклоприсоединения с образованием 4-, 5- и 6-членных циклов. Как было показано, первые из них обычно протекают при облучении ненасыщенных соединений. Образование же 6-членных циклов, происходящее, как правило, в термических условиях (реакция Дильса—Альдера), — сравнительно редкий случай в фотохимии, исключение здесь составляют лишь ненасыщенные соединения с гетероатомами.

Реакции 1,3-диполей с ненасыщенными системами, т. е. создание пятичленных гетероциклов [6], тоже осуществляются обычно при комнатной температуре или при нагревании (что согласуется с правилами отбора, так как в этих реакциях принимает участие $4 + 2 = 6$ электронов: четыре электрона распределены между тремя центрами диполя). Кстати напомнить, что первая реакция 1,3-циклоприсоединения была осуществлена на примере взаимодействия 1,3-диполя (это был диазоуксусный эфир) и ацетиленового производного.

Эдуард Бухнер по рекомендации Теодора Курциуса, учеником, сотрудником и другом которого он был, исследовал взаимодействие алифатических диазосоединений с эфирами ацетилендикарбоновой, фумаровой и малеиновой кислот. При этом им были выделены пятичленные гетероциклы (с сохранением азота исходного диазосоединения) [7].

В различные периоды развития органической химии названные реакции классифицировались по-разному [6]. Их называли 1,3-диполярным циклоприсоединением, поскольку в качестве субстрата в них выступали 1,3-диполярные соединения, или 3+2-циклоприсоединением, согласно числу атомов, участвующих в образовании конечного циклоаддукта. В соответствии с рассмотренными правилами отбора — правилами Вудворда—Гоффмана — их следует относить к реакциям [4+2]-циклоприсоединения. Для того чтобы исключить возникающую иногда путаницу, обусловленную существованием различных классификаций процессов циклоприсоединения, мы приводим таблицу с указанием возможных обозначений тех или иных типов наиболее часто встречающихся реакций в соответствии с той или иной классификацией:

Различные классификации реакций циклоприсоединения

Реакция *) Д ДПФ Цикл	по числу электронов $m + n$	по диполю	по размеру цикла
	0 + 2	1,1 – ЦП **)	1 + 2 → 3
	2 + 2	1,2 – ЦП	2 + 2 → 4
	4 + 2	1,3 – ЦП	3 + 2 → 5
	4 + 2	1,4 – ЦП	4 + 2 → 6
	4 + 4	Цикло- димеризация	4 + 4 → 8

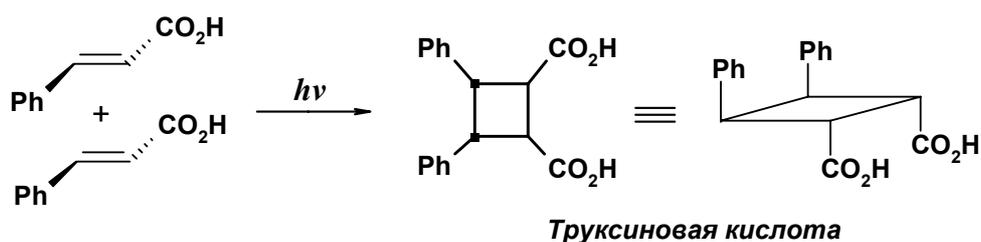
Примечание. *) Д — диполь; ДПФ — диполярфил; **) ЦП — циклоприсоединение

Приведем еще несколько примеров циклоприсоединения, имеющих серьезную значимость. Так, циклизация производных этиленового ряда в циклобутаны лежит в основе так называемой топохимической полимеризации, т. е. процессов, протекающих в твердой фазе, контролируемых структурой кристаллической решетки. В изучение ее большой вклад внесла школа Шмидта, который исследовал полимеризацию производных коричных кислот в твердой фазе под действием света. Шмидт и его сотрудники сформулировали принцип наименьшей упаковки, т. е. они выяснили, что полимеризация идет с образованием кристаллов с наименьшим пространственным объемом; результат фотоциклоприсоединения определяется пространственным расположением и удаленностью атомов углерода («топохимический контроль»); расстояния между стопками должно быть не более 4 Å, а угол между ненасыщенными связями в стопках соединений, принимающих участие в фотополимеризации, не должен быть больше 45°, иначе получаются структуры, неактивные в димеризации со сдвинутыми относительно друг друга кратными связями.

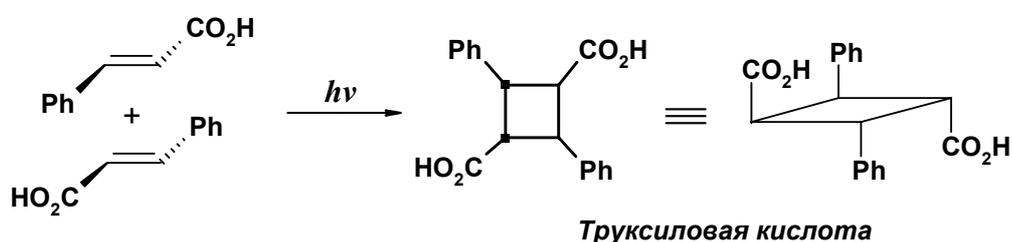
Цис-Коричная кислота и ее производные при облучении вообще не дают циклобутановые аддукты, а только изомеризуются в транс-производные.

Димеризация полимерных эфиров коричной кислоты, в частности — поливинилового эфира, имеет большое техническое значение, она используется при получении светокопировальных лаков, типографских красок, фиксируемых светом.

Фотодимеризация этого типа приводит к производным труксиновой кислоты, обладающим зеркальной симметрией:

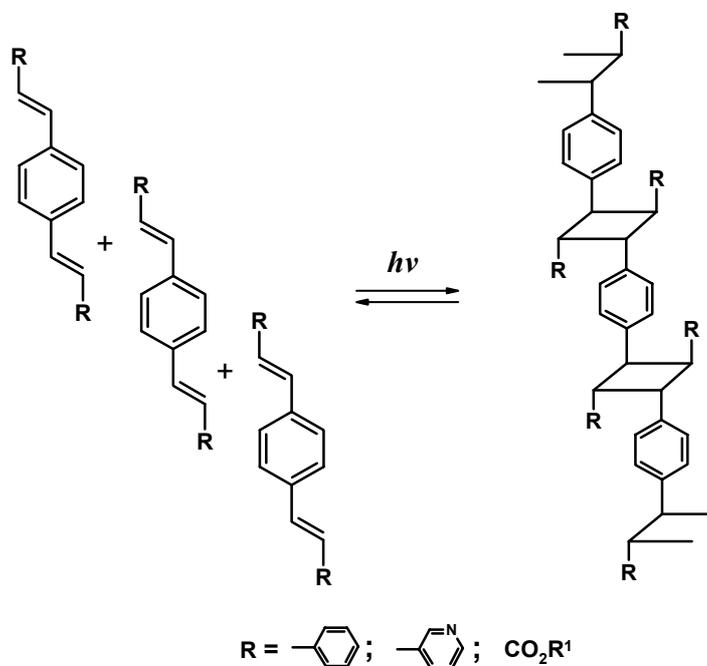


Труксиловую кислоту, имеющую центр симметрии, получают фотохимическим методом и в промышленности, так как ее эфиры оказались хорошими миорелаксантами, превосходящими по своей активности тубокурарин (яд группы кураре).

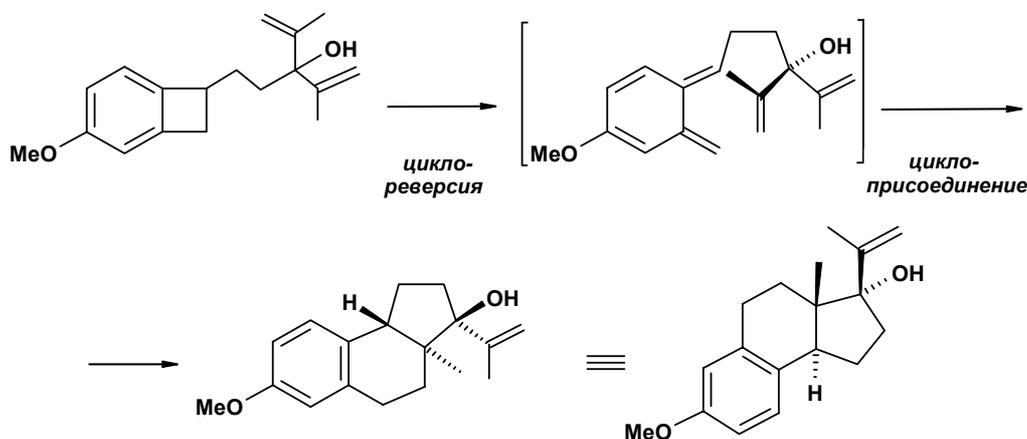


Таким образом, было показано, что, подбирая соответствующие заместители в ненасыщенной молекуле, можно целенаправленно управлять характером упаковки производных коричных кислот и осуществлять асимметрические синтезы.

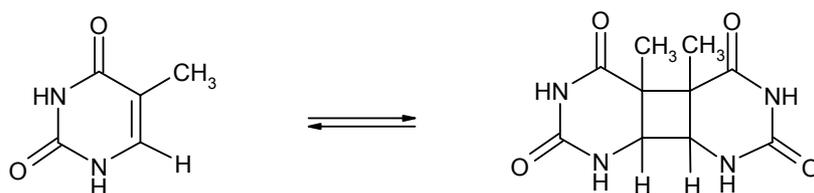
С помощью того же подхода из диенов, содержащих разнообразные заместители, были получены фотохромные полимеры:



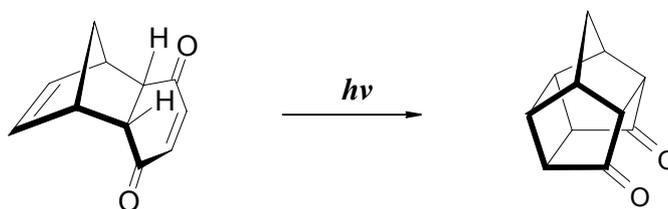
Практически важными оказались и многие внутримолекулярные реакции этого типа. Так, можно привести примеры протекающих внутримолекулярно последовательных стадий цикловерсии и циклоприсоединения на пути к синтезу кортикостероидов:



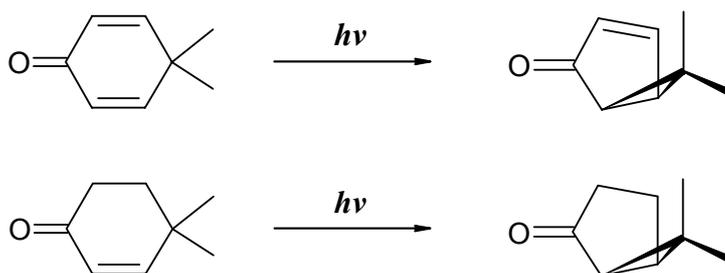
Большое биологическое значение имеет фотодимеризация енонов. Полагают, что одна из причин повреждения ДНК при УФ-облучении заключается в фотодимеризации тиминовых единиц цепи ДНК. Димеризация самого тимина протекает легко в соответствии с уравнением



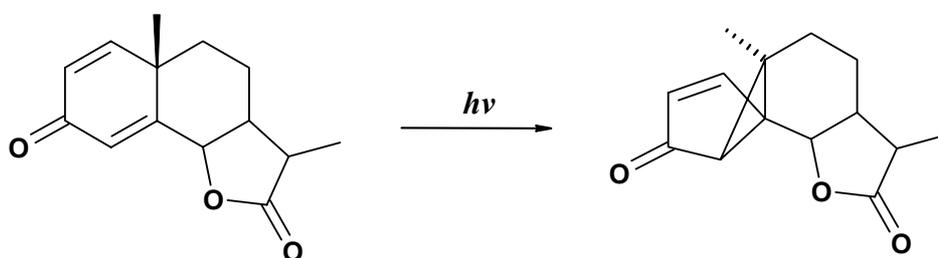
Димеризация циклопентенонов и циклогексенонов, как и их присоединение к олефинам и ацетиленам, а также — к алленам, скорее всего протекает ступенчато с участием триплетных состояний енонов, но может встречаться и согласованное циклоприсоединение. Так, целый ряд каркасных соединений был получен с помощью внутримолекулярных реакций этого типа:



В ряде случаев фотохимические превращения циклических енонов и диенонов могут рассматриваться не как бирадикальные реакции, а как согласованные процессы, протекающие в соответствии с теорией сохранения орбитальной симметрии по типу 2+2-циклоприсоединения.



Формально приведенные перегруппировки можно представить как присоединение σ -связи 4-5 к π -связи 2-3, т. е. отнести их к циклоприсоединению типа $[\sigma_2+\pi_2]$ (4-й С-атом атакует С-атом в положении 2, 5-й С-атом взаимодействует с атомом С-3). А в связи с тем, что они осуществляются фотохимически, эти реакции должны представлять собой или $[\sigma_{2s}+\pi_{2s}]$ - или $[\sigma_{2a}+\pi_{2a}]$ -процессы. Первый вариант сразу следует исключить, ибо циклоприсоединение по отношению к двойной связи в положении 2-3 не может быть супрафациальным, так как такой процесс приводил бы к транс-связыванию между трехчленным и пятичленным циклами. Следовательно, рассматриваемые превращения должны быть непременно $[\sigma_{2a}+\pi_{2a}]$ -реакциями. Это требует антарифациального присоединения по отношению к двойной связи 2-3 и инверсии у 4-го углеродного атома. Именно такой результат, т. е. антарифациальное присоединение по двойной связи и инверсия у насыщенного С-атома, наблюдается при классическом превращении сесквитерпенового лактона α -сантонина (при его облучении УФ-светом в спирте или диоксане) в люмисантонин:



Превращения этого типа, часто наблюдающиеся в химии природных соединений, называют сантониновой перегруппировкой.

Итак, рассмотренные правила, получившие наименование правил Вудворда—Гоффмана, позволяют, с одной стороны, предсказывать условия проведения реакций циклоприсоединения, протекающих согласованно без промежуточного образования частиц ионного или радикального характера, с другой стороны, они могут и подтверждать механизм исследуемой реакции — согласованный он или несогласованный. Для супраповерхностных, или супрафациальных, процессов термический путь разрешен при участии в реакции $4q+2$ -электронов, а фотохимический — при участии $4q$ -электронов. Более того, запрещенные реакции становятся разрешенными, если одна молекула реагирует антароповерхностно. На основании этого может показаться, что легко осуществить синтез многих циклов больших размеров. Однако, если должно образо-

ваться кольцо, содержащее восемь или более атомов, согласованные механизмы, продолжая оставаться разрешенными по симметрии для упомянутых случаев, оказываются трудно осуществимыми из-за энтропийного фактора (два конца одной системы должны одновременно встретиться с двумя концами другой). Исключение составляют те случаи, когда один или оба реагента циклические — число возможных конформаций для таких молекул намного меньше.

Главные свидетельства в пользу согласованного механизма:

- 1) стереоселективность или стереоспецифичность по отношению как к диполлю, так и к диполярофилу,
- 2) как правило, отсутствие зависимости скорости реакции от полярности растворителя,
- 3) высокие отрицательные значения энтропии.

Правила орбитальной симметрии применимы только к согласованным реакциям и основываются на принципе, согласно которому в течение всего процесса поддерживается максимальное связывание [1–3, 8].

В разработке ряда различных способов применения принципа сохранения орбитальной симметрии участвовали известнейшие и выдающиеся ученые, подготовившие мощный скачок в развитии теории органических реакций [9]. Вот их имена:

Вудворд Роберт Бернс (1917–1979), бывший профессором органической химии Гарвардского университета, университетов в Кэмбридже и Массачусетсе (США), работавший в области препаративной и теоретической химии, УФ-спектроскопии, тотального синтеза многих природных соединений, пептидов, стероидов, алкалоидов, простагландинов, ферроценов, хлорофилла, витамина В₁₂ и т. д. За плодотворную работу в области синтеза и теоретической органической химии получил Нобелевскую премию в 1965 году. В соавторстве с Р. Хоффманом выдвинул концепцию о сохранении орбитальной симметрии в перициклических реакциях.

Хоффман Рональд (р. 1937) — профессор Корнеллского университета, университетов в Итаке и Нью-Йорке, химик-теоретик, работавший в области ненасыщенных, ароматических, металлоорганических соединений, разрабатывавший теорию возбужденных состояний, электроциклических реакций, правила сохранения орбитальной симметрии (правила отбора Вудворда—Хоффмана). Совместно с К. Фукуи, в 1981 году получил Нобелевскую премию по химии за развитие теории механизмов органических реакций. Увлекается живописью (в Германии устраивались выставки его работ), литературой (автор драматической пьесы об истории открытия кислорода).

Фукуи Кеничи (р. 1918) — профессор химии университета Киото (Япония) до 1982 года, президент Технологического института в Киото (до 1988 г.), директор Института фундаментальной химии. Области научных интересов включают теорию химических реакций, квантовую химию. Основоположник теории граничных орбиталей. В 1981 году, совместно с Р. Хоффманом, получил Нобелевскую премию по химии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ ССЫЛКИ

1. Woodward R. B., Hoffmann R. J. Amer. Chem. Soc. 1965. Vol. 87. P. 395, 2046, 2511.
2. Woodward R. B., Hoffmann R. Die Erhaltung der Orbitalsymmetrie. Verlag chemie GmbH, 1970.
3. Вудворд Р., Хоффман Р. Сохранение орбитальной симметрии. М., 1971.
4. Фуки К. Topics Current Chemistry. 1970. Vol. 15. P. 1.
5. Дьюар М., Догерти Р. Теория возмущения молекулярных орбиталей в органической химии. М., 1977.
6. Хьюзген Р., Грэши Р., Сойер Дж. Алкены в реакциях присоединения // Химия алкенов / Ред. С. Патая. Л., 1969. С. 444.
7. Buchner E. Ber. 1889. Bd 22. S. 842–847; Ibid. 1888. Bd 21. S. 2637–2647.
8. 1,3-Dipolar Cycloaddition Chemistry, Ed. Padwa, Vol. 1,2. J. Wiley and Sons, N.-Y., 1984.
9. Rompp Chemie Lexikon, Hrsg.: J. Falbe, M. Regitz, Stuttgart; New York: Thieme, 1995.

L. Rodina

GENERAL VIEW ON THE CONCERTED CYCLE ADDITION REACTIONS

The paper incorporates a brief presentation of the history and the simplest description of the “conservation of orbital symmetry” theory, known as the so called “Woodward—Hoffmann rules”. A series of examples of concerted cycle additions which found a wide application not only in the laboratory practice but in the modern industry are also given. A table with different types of the concerted cycle addition classifications is presented.