



Научные основы и технологии «зеленой» химии

Автор: доцент кафедры «Химические и пищевые
технологии»

Белоусов Артем Сергеевич



- ✓ **Зелёная химия (Green Chemistry)** — научное направление в химии, к которому можно отнести любое усовершенствование химических процессов, которое положительно влияет на окружающую среду. Как научное направление, возникло в начале 1990 гг.
- ✓ **Зеленая, или экологически рациональная, химия** изучает развитие процессов и технологий, которые являются результатом более эффективных химических реакций с наименьшим количеством вредных отходов и выбросов, по сравнению с традиционными химическими реакциями.
- ✓ **Зеленая химия** охватывает все аспекты и типы химических процессов, которые сокращают негативное влияние на человеческое здоровье и окружающую среду, в соответствии с реальными технологическими процессами.
- ✓ **Сокращая использование или создание вредных веществ**, связанных с особым синтезом или процессом, химики смогут во многом снизить риск как для здоровья человека, так и для экологии.



Цель «зеленой» химии – **предотвращение** загрязнения в процессе создания химических продуктов, т.е. предотвращение загрязнения на самых начальных стадиях планирования и осуществления химических процессов.

Организация химических процессов в соответствии с принципами зеленой химии предусматривает:

- получение необходимых веществ и потребительских товаров;
- оценку возможных последствий для здоровья и окружающей среды.



За прошедшие годы в США и Европе были созданы сотни организаций, которые реализуют программы, проекты, а также выделяют гранты в области «зеленой» химии:

- Президентский проект по «зеленой» химии (США): программа включает исследовательские гранты, образовательные курсы, ежегодные премии и финансовую поддержку компаниям и ученым, заинтересованным вопросами зеленой химии.
- Организация по проблемам «зеленой» химии (Великобритания). Позднее подобные организации были также созданы в Италии, Германии и Австралии.
- Создание научного журнала «Green Chemistry» (издательство – Royal Society of Chemistry, RSC).
- «Зеленую» химию как часть деятельности признали следующие организации: «Организация по экономическим отношениям и развитию» (OECD), «Международный союз теоретической и прикладной химии» (IUPAC), «Европейский совет по химической промышленности» (CEFIC), «Федерация европейских сообществ по



Президентский проект по «зеленой» ХИМИИ

- ✓ За 23 года с момента основания премии награды были вручены 118 победителям в различных номинациях.
- ✓ Благодаря внедрению технологий победителей удалось достичь следующих результатов:
 - Отказ от использования каждый год **400 тыс. т** вредных химических веществ и растворителей. Такого количества достаточно, чтобы заполнить почти 3800 железнодорожных цистерн (поезд длиной почти 75 км).
 - Каждый год экономится **79 миллиардов литров воды** – количество, которое суммарно используют 820 000 человек ежегодно.
 - Выбросы углекислого газа в атмосферу сократились на **3 млн т**, что эквивалентно уменьшению автопарка на 810000 автомобилей.

Глобальные проблемы биосферы

- **увеличение численности населения Земли** – по прогнозам специалистов, в 2050 году численность населения Земли достигнет 9,2 млрд. человек;
- **сокращение невозобновляемых ресурсов Земли**, в том числе энергетических;
- **разрушение озонового слоя Земли**;
- **сокращение в мире запасов пресной вод** – примерно 75 % мировых запасов пресной воды заключено в ледниках и айсбергах; почти вся остальная вода, в основном, находится под землей в водоносных слоях;
- **загрязнение Мирового океана**;
- **загрязнение атмосферы и эрозия почвы**;
- **сокращение площади лесов**, особенно тропических и опустынивание этих территорий;
- **сокращение биоразнообразия** в природе.

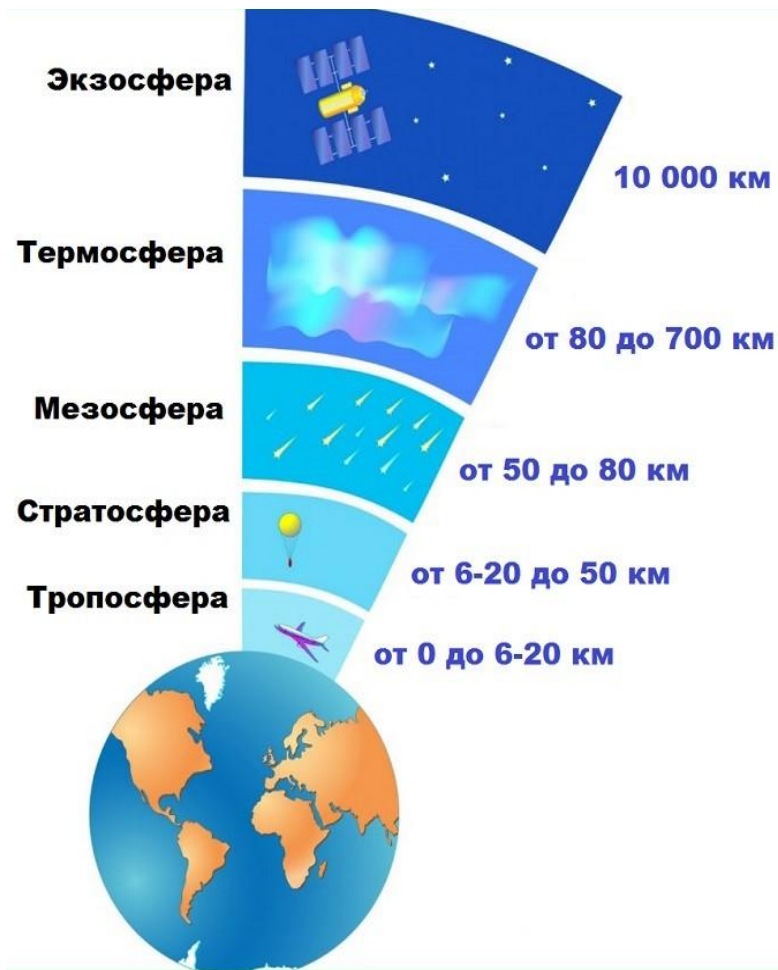
Химия и загрязнение атмосферы Земли

Загрязнение атмосферы Земли – принесение в атмосферный воздух новых, нехарактерных для него физических, химических и биологических веществ или изменение их естественной концентрации.

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) за 2014 год, ежегодно в мире примерно **3,7 миллионов человек умирает из-за загрязнения атмосферного воздуха.**

Общее количество смертей, связанных с воздействием загрязненного воздуха как в помещениях, так и в атмосфере, достигает **7 миллионов в год.**

По данным ученых Техасского университета в Остине глобальное загрязнение воздуха **сокращает продолжительность жизни человека в среднем на один год.**





Виды загрязнения атмосферы Земли

- ❑ **физическое** – механическое (пыль, твердые частицы), радиоактивное (радиоактивное излучение и изотопы), электромагнитное (различные виды электромагнитных волн, в том числе радиоволны), шумовое (различные громкие звуки и низкочастотные колебания) и тепловое загрязнение (например, выбросы тёплого воздуха и т. п.);
- ❑ **химическое** – загрязнение газообразными веществами и аэрозолями. На сегодняшний день основные химические загрязнители атмосферного воздуха это: оксид углерода (IV), оксиды азота, диоксид серы, углеводороды, альдегиды, тяжёлые металлы (Pb, Cu, Zn, Cd, Cr), аммиак, пыль;
- ❑ **биологическое** – в основном загрязнение микробной природы. Например, загрязнение воздуха вегетативными формами и спорами бактерий и грибов, вирусами, а также их токсинами и продуктами жизнедеятельности.



Источники загрязнения атмосферы Земли

- ❑ **Природные** (естественные загрязнители минерального, растительного или микробиологического происхождения, к которым относят извержения вулканов, лесные и степные пожары, пыль, пыльцу растений, выделения животных и др.)
- ❑ **Искусственные** (антропогенные), которые можно разделить на несколько групп:
 - ❑ **Транспортные** – загрязнители, образующиеся при работе автомобильного, железнодорожного, воздушного, морского и речного транспорта;
 - ❑ **Производственные** – загрязнители, образующиеся как выбросы при технологических процессах, отоплении;
 - ❑ **Бытовые** – загрязнители, обусловленные сжиганием топлива в жилище и переработкой бытовых отходов.

По составу антропогенные источники загрязнения атмосферы также можно разделить на несколько групп:

- ❑ **Механические** загрязнители – пыль цементных заводов, пыль от сгорания угля в котельных, топках и печах, сажа от сгорания нефти и мазута, стирающиеся автопокрышки и т. д.;
- ❑ **Химические** загрязнители – пылевидные или газообразные вещества, способные вступать в химические реакции;
- ❑ **Радиоактивные** загрязнители.



Основные загрязнители атмосферы Земли

- **Оксид углерода (CO)** – бесцветный газ, не имеющий запаха, известен также под названием «угарный газ». Образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (угля, газа, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре. При вдыхании угарный газ за счёт имеющейся в его молекуле двойной связи образует прочные комплексные соединения с гемоглобином крови человека и тем самым блокирует поступление кислорода в кровь.
- **Двуокись углерода (CO_2)** – бесцветный газ с кисловатым запахом и вкусом, продукт полного окисления углерода. Является одним из парниковых газов.
- **Диоксид серы (SO_2)** (диоксид серы, сернистый ангидрид) образуется в процессе сгорания серосодержащих ископаемых видов топлива, в основном угля, а также при переработке сернистых руд. Он, в первую очередь, участвует в формировании кислотных дождей. Общемировой выброс SO_2 оценивается в 190 млн т в год.



Основные загрязнители атмосферы Земли

□ **Оксиды азота** – газообразные вещества: монооксид азота NO и диоксид азота NO_2 объединяются одной общей формулой NO_x . При всех процессах горения образуются окислы азота, причем большей частью в виде оксида. Чем выше температура сгорания, тем интенсивнее идет образование окислов азота.

Другим источником окислов азота являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту и нитраты, анилиновые красители, нитросоединения. Количество окислов азота, поступающих в атмосферу, составляет 65 млн т в год. От общего количества выбрасываемых в атмосферу оксидов азота на транспорт приходится 55 %, на энергетику – 28 %, на промышленные предприятия – 14 %, на мелких потребителей и бытовой сектор – 3 %.



Основные загрязнители атмосферы Земли

- **Озон (O_3)** – газ с характерным запахом, более сильный окислитель, чем кислород. Его относят к наиболее токсичным из всех обычных загрязняющих воздух примесей. В нижнем атмосферном слое озон образуется в результате фотохимических процессов с участием диоксида азота и летучих органических соединений.
- **Углеводороды и другие летучие органические соединения** – к ним относят тысячи различных загрязняющих атмосферу веществ, содержащихся в несгоревшем бензине, жидкостях, применяемых в химчистке, промышленных растворителях и т. д.
- **Свинец (Pb)** – серебристо-серый металл, токсичный в любой известной форме. Широко используется для производства красок, боеприпасов, типографского сплава и т. п. Около 60 % мировой добычи свинца ежегодно расходуется для производства кислотных аккумуляторов. Однако основным источником (около 80 %) загрязнения атмосферы соединениями свинца являются выхлопные газы транспортных средств, в которых используется этилированный бензин.

Предотвращение загрязнения



Предотвращение загрязнения заключается в:
сокращении или устранении отходов путем
усовершенствования производственных
процессов;
использования нетоксичных или менее
токсичных веществ;
повторного использования материалов вместо
образования отходов.

✓ REUSE
✓ REDUCE
✓ RECYCLE

Концепция устойчивого развития

Устойчивое развитие (Sustainable Development), также гармоничное развитие, сбалансированное развитие

– процесс экономических и социальных изменений, при котором эксплуатация природных ресурсов, направление инвестиций, ориентация научно-технического развития, развитие личности и институциональные изменения согласованы друг с другом и укрепляют нынешний и будущий потенциал для удовлетворения

человеческих потребностей. Проведение в 1972 году в Стокгольме Конференции ООН по окружающей среде и созданию Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) ознаменовало

включение международного сообщества на государственном уровне в решение экологических проблем.

Главное беспокойство относительно устойчивого развития доставляет выброс опасных веществ в окружающую среду. Зеленая химия может оказать существенное влияние в этой области.

Концепция устойчивого развития стала базой для создания **двенадцати принципов зеленой химии.**





Двенадцать принципов зеленой химии

Сформулированы: Anastas, P. T.; Warner, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, 1998.



Пол Анастас – Директор Центра Зеленой Химии Йельского университета



Джон Уорнер – президент и главный технолог Института зеленой химии Уорнера Бэбкока, Массачусетс



Двенадцать принципов зеленой химии

Принцип 1. Упреждение.

Лучше не допускать образования отходов, чем заниматься их переработкой или уничтожением.

- Например, в США ежегодно производится около 12 млрд т отходов, причем около 300 млн т из них опасны для здоровья человека и окружающей среды.
- Химическая промышленность производит 70 % от общего количества опасных отходов, а также наиболее токсичные органические отходы (около 150 000 т) с содержанием метанола и ксилолов.
- Органические отходы, которые вредны для человека и окружающей среды, в основном образуются на промежуточных стадиях органического синтеза.
- Наиболее «грязными» процессами основного органического и нефтехимического синтеза являются процессы галогенирования, окисления, алкилирования, нитрования и сульфирования.
- Предотвращения образования отходов в конечном итоге должно снизить себестоимость производства, чем их переработка или утилизация.



Двенадцать принципов зеленой химии

Принцип 2. Экономия атомов.

Методы синтеза должны разрабатываться таким образом, чтобы в состав конечного продукта включалось как можно больше атомов реагентов, использованных в ходе синтеза.

Атомная эффективность – полнота использования исходного вещества.

Атомная эффективность = (масса целевого продукта)/(масса целевого продукта + масса отходов)

Атомную эффективность часто выражают через **Е-фактор**, который можно определить как отношение массы всех побочных продуктов (которые формально являются отходами производств) к массе целевого продукта.

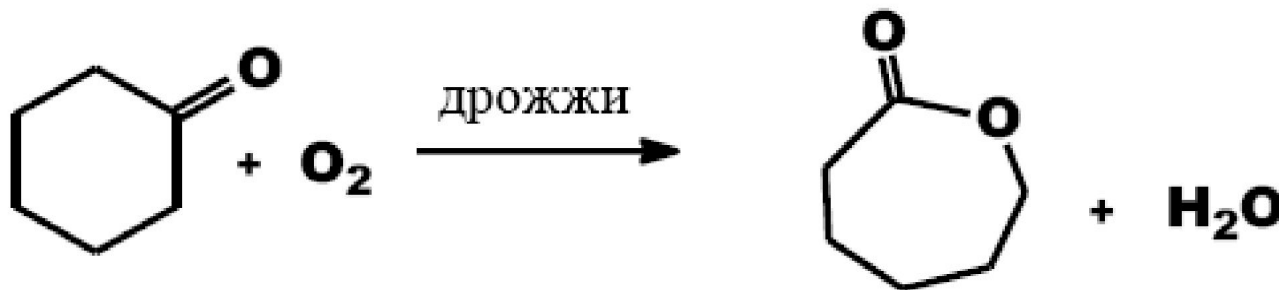
Величины Е-фактора для различных отраслей промышленности

Промышленность	Объем производства, т/год	Е-фактор
Нефтехимическая	10^6-10^8	0.1
Крупнотоннажная химия	основная 10^4-10^6	1-5
Тонкий химический синтез	10^2-10^4	5-50

Двенадцать принципов зеленой химии

Принцип 3. Снижение опасности процессов и продуктов синтеза.

Методы синтеза по возможности следует выбирать так, чтобы используемые и синтезируемые вещества были как можно менее вредными для человека и окружающей среды.



- Конверсия кетона в капролактон (реакция Байера-Виллигера) обычно протекает под действием *m*-хлорнадбензойной кислоты.
- Предложен новый способ проведения процесса с использованием хлебопекарных дрожжей в качестве биокатализатора и кислорода воздуха в качестве окислителя.
- Пример содержит сразу два «зеленых» компонента – катализатор и воздух (вместо взрывоопасного и неэкономичного окислителя).
- Подавляющее большинство капролактона используется в качестве прекурсора для получения капролактама.



Двенадцать принципов зеленой химии

Принцип 4. Конструирование «зеленых» материалов.

Производимые химические продукты должны выбираться таким образом, чтобы сохранить их функциональную эффективность при снижении токсичности.

- Примером может служить замена биоцидов для морских противообрастающих красок, используемых в судостроении и морских сооружениях на основе токсичных органических соединений олова и ртути на экологичный и биоразлагаемый биоцид SEA-NINE.
- Ведутся работы по получению биоразлагаемых полимеров для современных пищевых упаковок. Например, компания DowChemical разработала несколько лет назад полимер NatureWorks на основе полимолочной кислоты.

Принцип 5. Снижение опасности процессов и продуктов синтеза.

Вспомогательные вещества при производстве, такие как растворители или разделяющие агенты, лучше не использовать совсем, а если это невозможно, их использование должно быть безвредным.

- Растворитель должен быть химически стабильным, обладать низкой летучестью и легко регенерироваться.



Двенадцать принципов зеленой химии

Классификация растворителей по степени их «зелености»

Зеленые	Относительно зеленые	Нежелательные
Метанол	Циклогексан	Пентан
Этанол	Метилциклогексан	Гексан
Пропанол-1	Гептан	Диизопропиловый эфир
Пропанол-2	Изооктан	Дихлорметан
Бутанол-1	Метил- <i>трет</i> -бутиловый эфир	Хлороформ
<i>трет</i> -Бутанол	Ацетонитрил	Бензол
Этилацетат	Тetraгидрофуран	Диметилацеталь
Изопропилацетат	Уксусная кислота	Четыреххлористый углерод
Ацетон	Ксилолы	Диметоксиэтан
Метилэтилкетон	Толуол	Пиридин

Двенадцать принципов зеленой химии

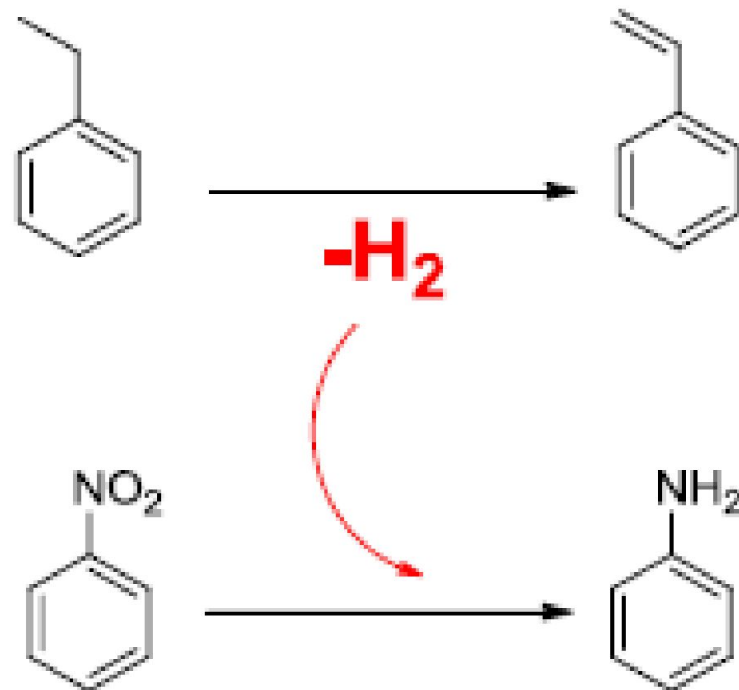
Принцип 6. Энергосбережение.

Обязательно следует учитывать энергетические затраты и их влияние на окружающую среду и стоимость продукта. Синтез по возможности надо проводить при температуре, близкой к температуре окружающей среды, и при атмосферном давлении.

- катализаторы;
- микроволновое излучение для нагрева;
- параллельные схемы.

Эффективное использование перечисленных методов и рекуперация – все эти подходы должны быть реализованы для превращения многих экологически малопривлекательных процессов в **«зеленую» химию**.

Рекуперация тепла – возвращение части материала или энергии, расходуемых при проведении того или иного технологического процесса, для





Двенадцать принципов зеленой химии

Принцип 7. Использование возобновляемого сырья.

Исходные и расходуемые материалы должны быть возобновляемыми во всех случаях, когда это технически и экономически выгодно.

- ▣ Производство биоэтанола из сахарного тростника. Использование биоэтанола в качестве топлива позволяет снизить выбросы диоксида углерода.
- ▣ Производство биодизеля из рапсового масла. Биодизель – жидкое моторное биотопливо, представляющее из себя смесь моноалкильных эфиров жирных кислот.
- ▣ Использование пищевой упаковки NatureWorks на основе полимолочной кислоты.

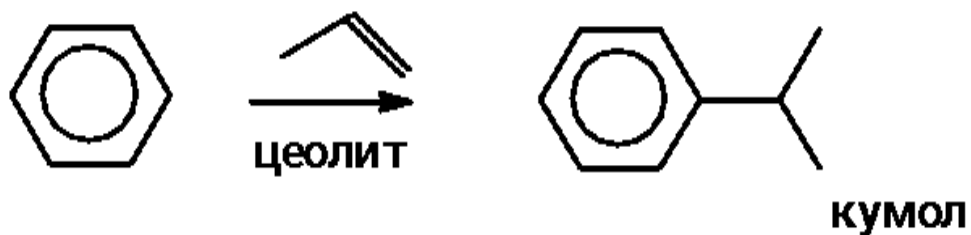
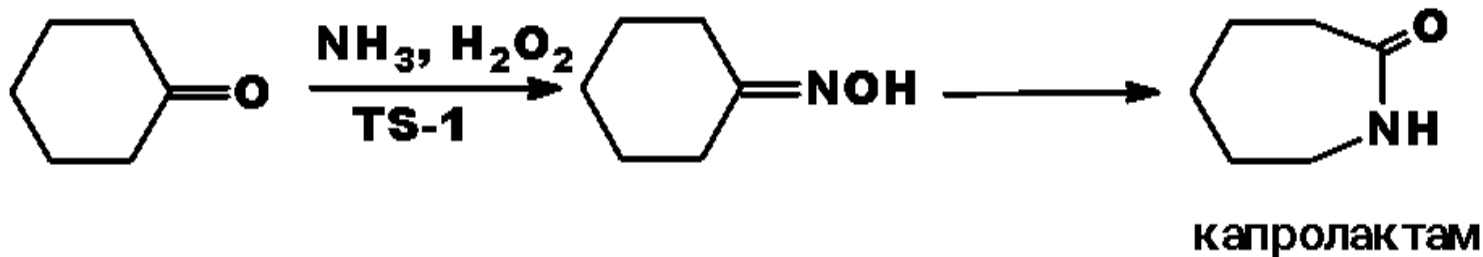
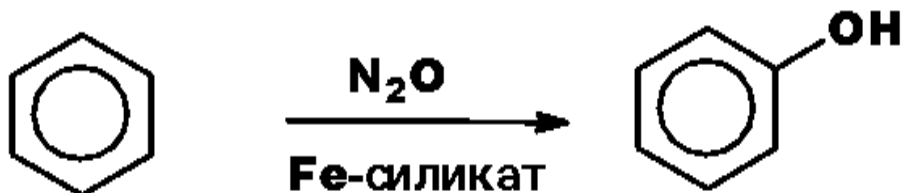
Принцип 8. Уменьшение числа промежуточных стадий.

Где возможно, надо избегать получения промежуточных продуктов (блокирующих групп, присоединение и снятие защиты и т.д.).

Двенадцать принципов зеленой химии

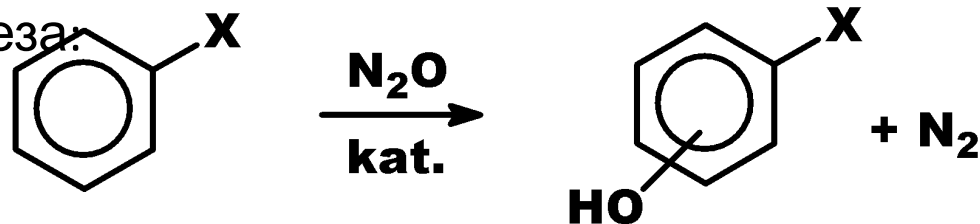
Принцип 9. Использование каталитических процессов.

Всегда следует отдавать предпочтение каталитическим процессам (по возможности наиболее селективным).



Двенадцать принципов зеленой химии

Особо следует отметить **процесс окисления бензола закистью азота (N_2O)**, разработанный Пановым и сотр. и доведенный до демонстрационной установки фирмой Solutia. Использование закисти азота в качестве мягкого и «экологически чистого» окислителя, побочным продуктом превращения которого является лишь азот, оказалось весьма эффективным для получения замещенных фенолов в присутствии дегидроксилированных высококремнистых цеолитов, практически не содержащих железа:



Показатель	Известная система		Новая система	
	Толуол	Фторбензол	Толуол	Фторбензол
Выход фенола, %	<10	14	до 55	40-50
Селективность, %	20	90	85-90	90-95
Стабильность	Низкая	Необратимая дезактивация	Высокая	Высокая



Двенадцать принципов зеленой химии

Принцип 10. Биоразлагаемость.

Химический продукт должен быть таким, чтобы после его использования он не оставался в окружающей среде, а разлагался на безопасные продукты.

Принцип 11. Обеспечение аналитического контроля в реальном масштабе времени.

Нужно развивать аналитические методики, чтобы можно было следить в реальном времени за образованием опасных продуктов.

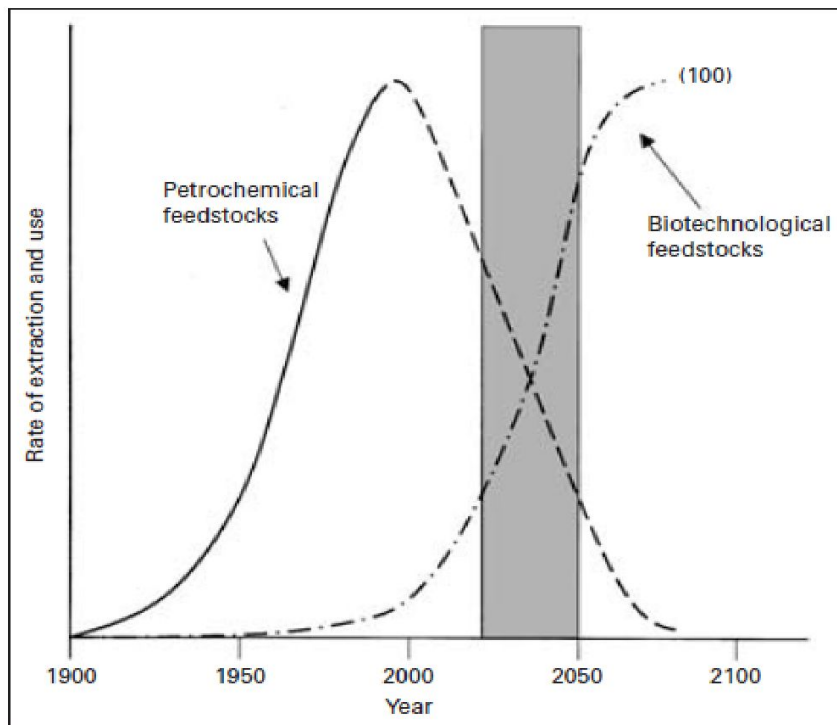
Принцип 12. Предотвращение возможности аварий.

Вещества и формы веществ, используемые в химических процессах, нужно выбирать таким образом, чтобы риск химической опасности, включая утечки, взрыв и пожар, были минимальными.

Устойчивое использование ресурсов

Использование возобновляемых и невозобновляемых ресурсов в органическом синтезе

Год	Возобновляемые ресурсы (масс%)	Нефтехимические ресурсы (масс%)
2000	0	100
2020	25	75
2035	50	50
2050	75	25
2065	100	0



Использование возобновляемых и невозобновляемых ресурсов в органическом синтезе



Устойчивое использование энергии

Использование различных видов энергии в химическом секторе

Год	Энергия ископаемого топлива (невозобновляемые источники) (%)	Возобновляемые источники (%)
2000	77	23
2025	60	40
2050	40	60
2075	20	80
2100	0	100

В настоящее время существует тенденция на переход на **возобновляемую («зеленую», неисчерпаемую) энергию** – энергию из источников, которые, по человеческим масштабам, являются неисчерпаемыми (энергия ветра, волн, солнечного света, геотермальная энергия).

Это связано с тем, что использование любого источника энергии, который включает сжигание и образование CO_2 , должно быть ограничено из-за проблемы глобального потепления (**Киотский протокол**).



Киотский протокол

Киотский протокол – международное соглашение, дополнительный документ к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992), принятое в Киото (Япония) в декабре 1997 года. Оно обязывает развитые страны и страны с переходной экономикой сократить или стабилизировать выбросы парниковых газов. Вступил в силу 16 февраля 2005 года после того, как его ратифицировали страны, суммарная квота которых по выбросам парниковых газов превышает 55 % (по состоянию на 1990 год). Киотский протокол был ратифицирован 191 страной и одним региональным содружеством – Европейским союзом.

Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК) – соглашение, подписанное более чем 180 странами мира, включая все страны бывшего СССР и все промышленно развитые страны, об общих принципах действия стран по проблеме изменения климата. Конвенция была принята на «Саммите Земли» в Рио-де-Жанейро в 1992 году и вступила в силу 21 марта 1994 года (Россия ратифицировала РКИК в 1994).



Киотский протокол

- ✓ Подписавшие документ страны договорились о **необходимости сокращения выбросов парниковых газов**, которые вызывают глобальное потепление.
- ✓ Согласно документу, в период с 2008 года по 2012 год **общий объем выбросов в атмосферу двуокиси углерода, метана и других промышленных газов должен быть сокращен на 5,2%** по сравнению с уровнем 1990 года.
- ✓ Согласно Протоколу, Евросоюз должен сократить выбросы на 8 %, Япония и Канада – на 6 %, страны Восточной Европы и Прибалтики— в среднем на 8 %, Россия и Украина – сохранить среднегодовые выбросы в 2008-2012 годах на уровне 1990 года.
- ✓ Страны Евросоюза в одностороннем порядке обязались сократить на 20% выбросы парниковых газов к 2020 году.
- ✓ Развивающиеся страны, а также Китай и Индия обязательств на себя не брали.
- ✓ Соединенные Штаты Америки заявили о неучастии в протоколе до 2013 года.



Возобновляемые ресурсы

Ресурсы

Возобновляемые
(биомасса)

Невозобновляемые
(нефть, газ, уголь)

Возобновляемое

сырье:

Углеводы, которые можно разделить на моносахариды, дисахариды, олигосахариды и полисахариды.

Лигнин является сложным (сетчатым) ароматическим природным полимером, который входит в состав наземных растительных организмов, продуктом биосинтеза.

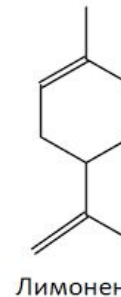
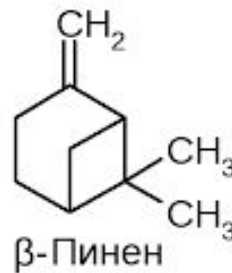
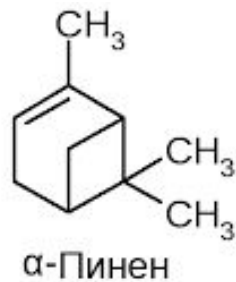
Масла и жиры – органические вещества, продукты этерификации карбоновых кислот и трёхатомного спирта глицерина.

Глицерин (пропантриол-1,2,3), образующийся при гидролизе, омылении или переэтерификации натуральных жиров и масел в качестве побочного продукта.

Терпены продукты биосинтеза общей формулы $(C_5H_8)_n$ с углеродным скелетом, формально являющиеся производными изопрена.

Диоксид углерода

Монотерпены $C_{10}H_{16}$ – природные углеводороды, образованные сочетанием двух изопреновых фрагментов и, соответственно, общей формулой $C_{10}H_{16}$: пинены, лимонен, фенхены, мирцен, сабинен.

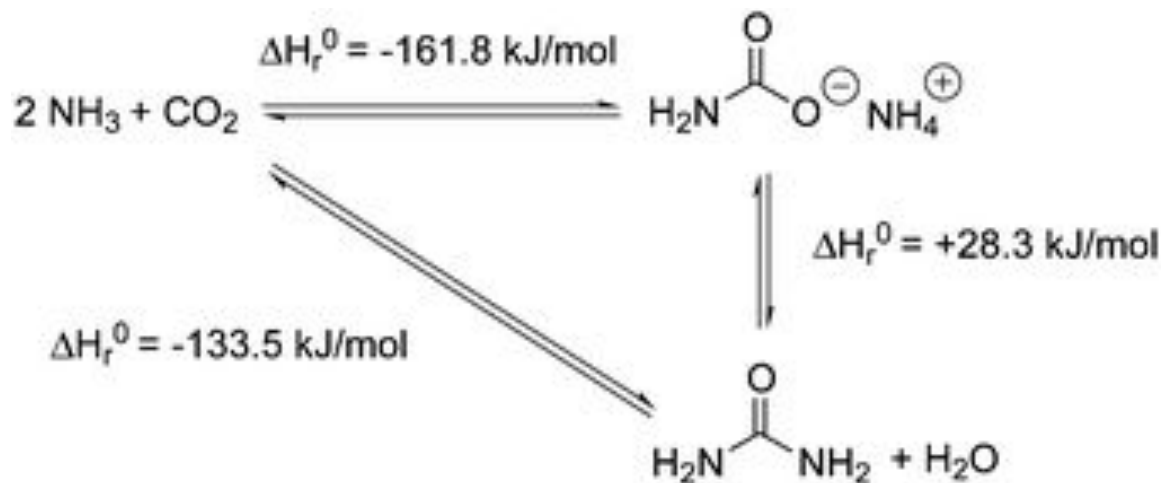


Сесквитерпены – группа органических соединений класса терпенов, в состав которой входят углеводороды от $C_{15}H_{24}$ до $C_{15}H_{32}$, а также их кислородные производные – спирты, альдегиды, кетоны: фарнезол, фарнезены, кадинены, кариофиллен.

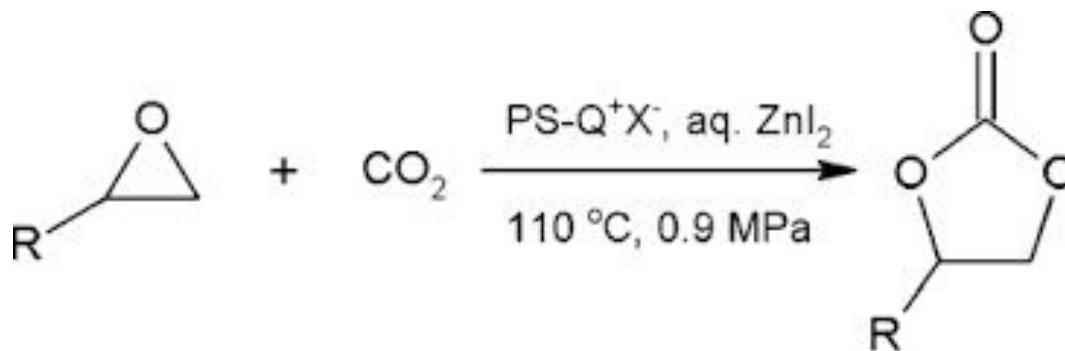
Дитерпены – органические соединения группы терпенов, состоящие из 4 изопреновых звеньев, с общей формулой $C_{20}H_{32}$: фитол, ретинол, андромедотоксин.

Тритерпены – органические соединения группы терпенов, состоящие из 6 изопреновых звеньев, с общей формулой $C_{30}H_{48}$: лупеол.

Синтез карбамида из аммиака и диоксида углерода

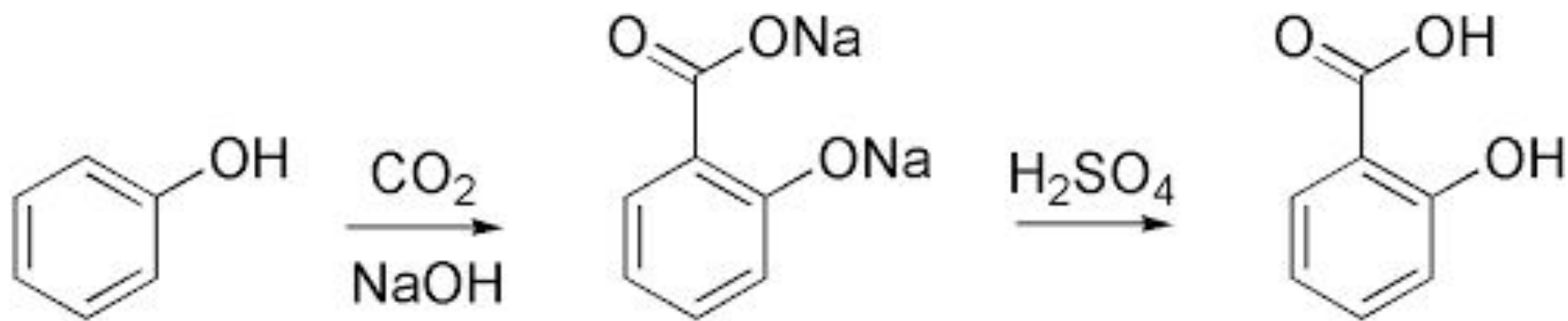


Синтез циклических карбонатов



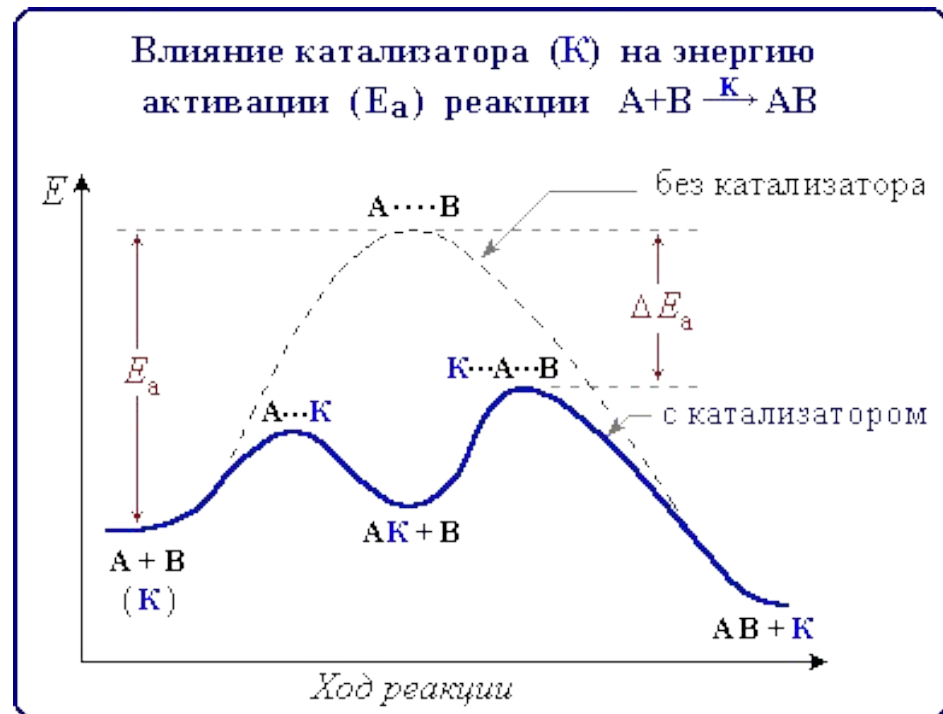
PS-Q⁺X⁻ - polymer-supported quaternary onium salt

Процесс Кольбе – синтез ароматических *o*-оксикислот действием CO_2 на щелочную соль соответствующего фенола. В промышленности используется для получения салициловой кислоты из фенола, аминосалициловой кислоты из *m*-аминофенола, β -оксинафтойной кислоты из β -оксинафтола и др.



Катализ – химическое явление, суть которого заключается в изменении скоростей химических реакций при действии некоторых веществ (их называют катализаторами).

Катализатор – вещество, которое многократно вступает в промежуточное химическое взаимодействие с участниками реакции и восстанавливает свой химический состав после каждого цикла промежуточных взаимодействий.



Основные характеристики катализа:

- Катализаторы уменьшают энергию переходного состояния, таким образом, уменьшая потребление энергии, требуемой для процесса.
- Катализаторы требуются в небольших количествах. В случае биокатализаторов необходимое количество катализаторов (чаще ферментов) очень мало, по сравнению с количеством реагентов.
- Регенерируемые и обратимые катализаторы эффективны для «зеленых» процессов.

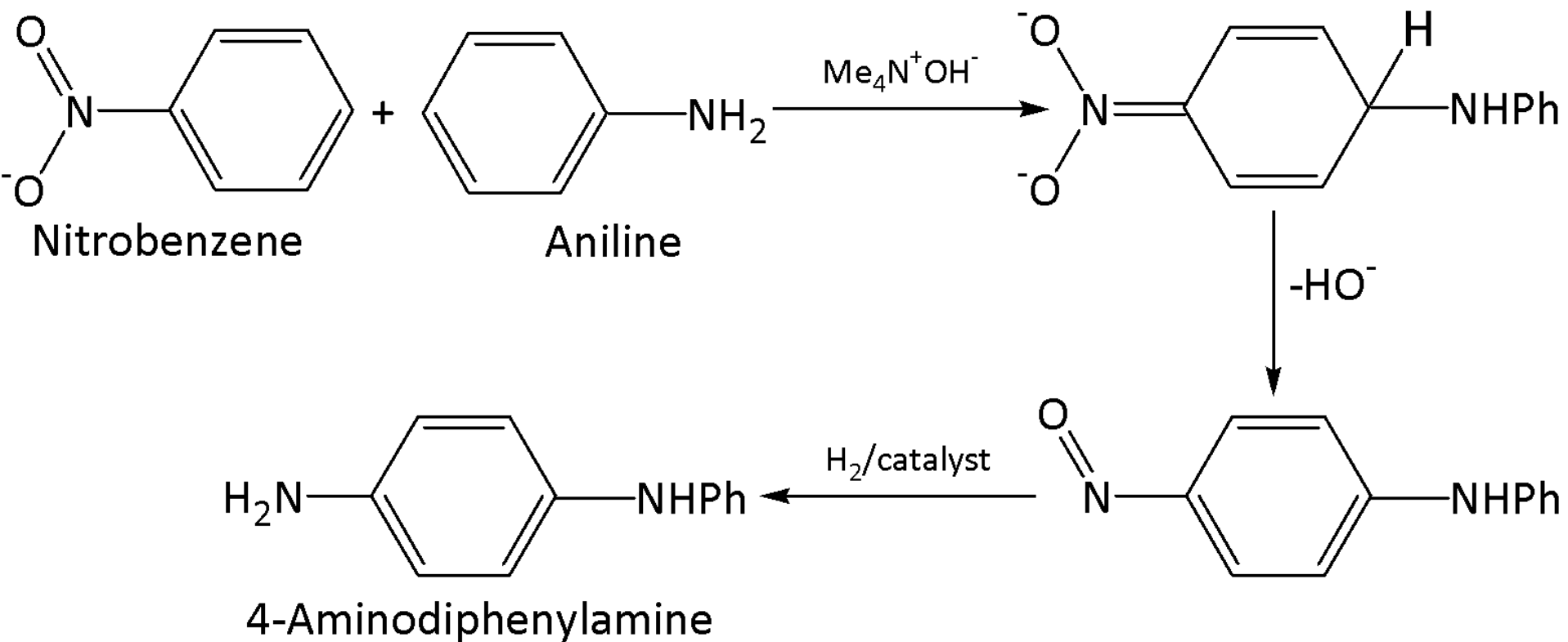


Катализ и зеленая химия

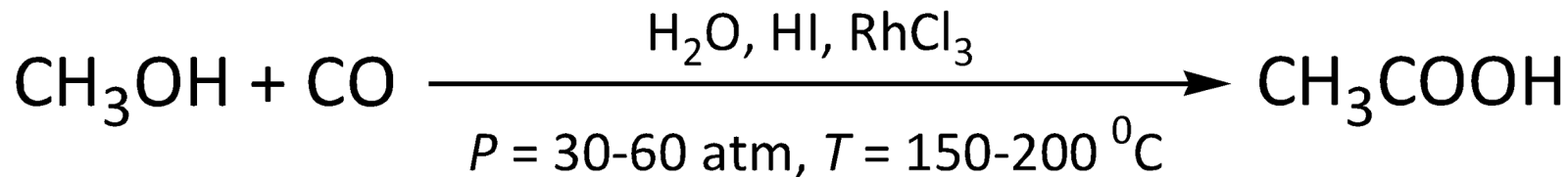
Особенности гомогенного и гетерогенного катализа:

Показатель	Гомогенный катализатор	Гетерогенный катализатор
Активность	Высокая	Различная
Селективность	Высокая	Различная
Срок службы	Различный	Длительный
Условия проведения процесса	Мягкие	Жесткие
Чувствительность к каталитическим ядам	Низкая	Высокая
Стоимость регенерации катализатора	Высокая	Часто не требуется
Диффузионные затруднения	Отсутствуют	Могут играть важную роль

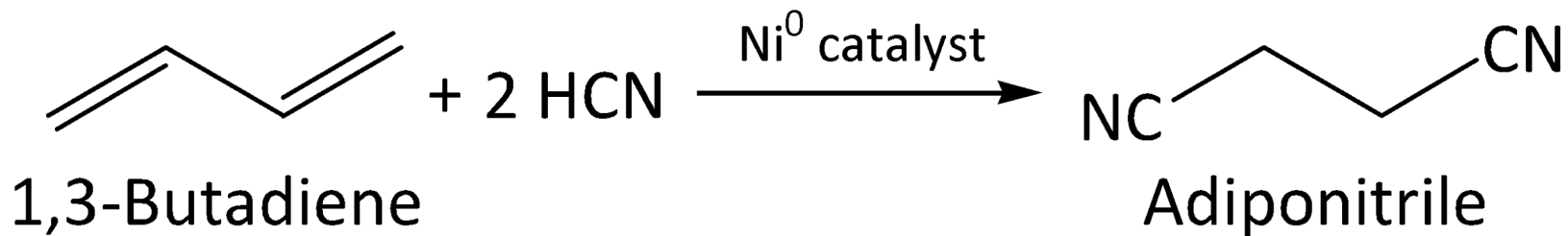
Гомогенный катализ и зеленая химия



Новый процесс синтеза 4-АДФА

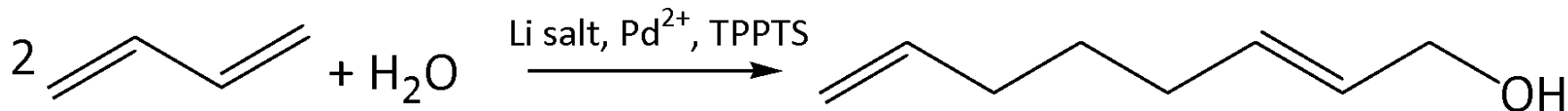


Процесс Monsanto: производство уксусной кислоты



Процесс DuPont: производство адипонитрила

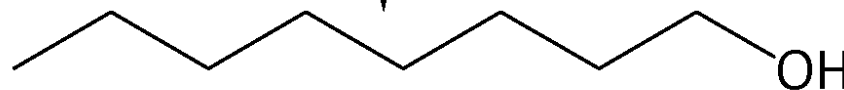
Гомогенный катализ и «зеленая» химия



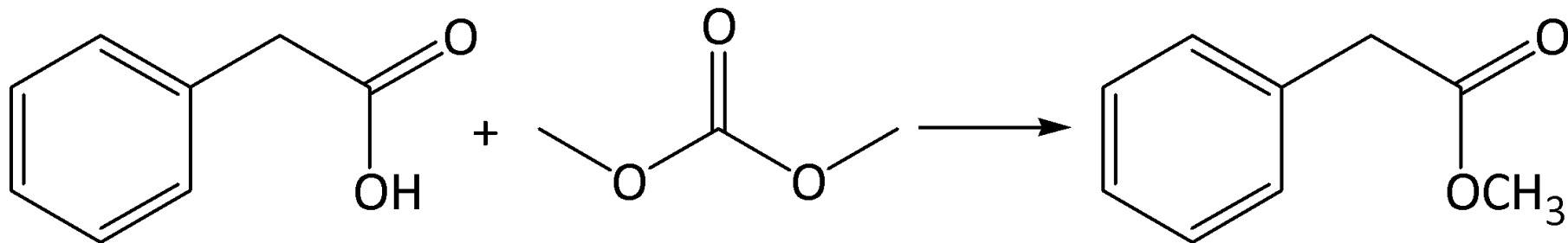
1,3-Butadiene

**Новый процесс
получения октанола-1**

+H₂ Ni



1-Octanol

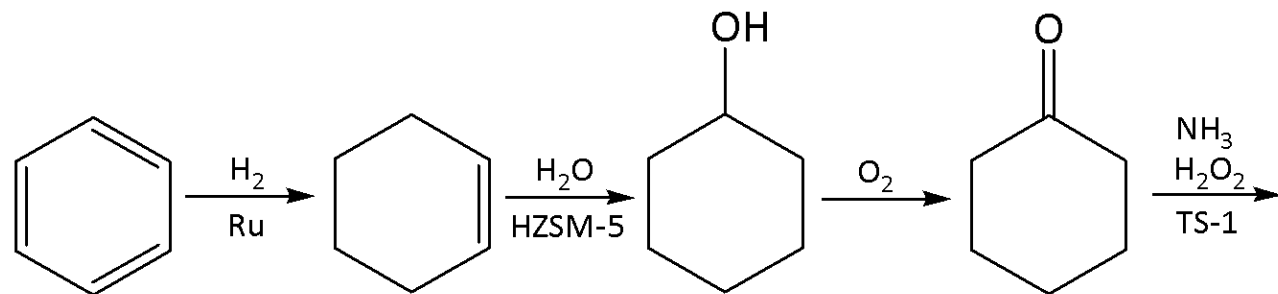


Dimethylcarbonate

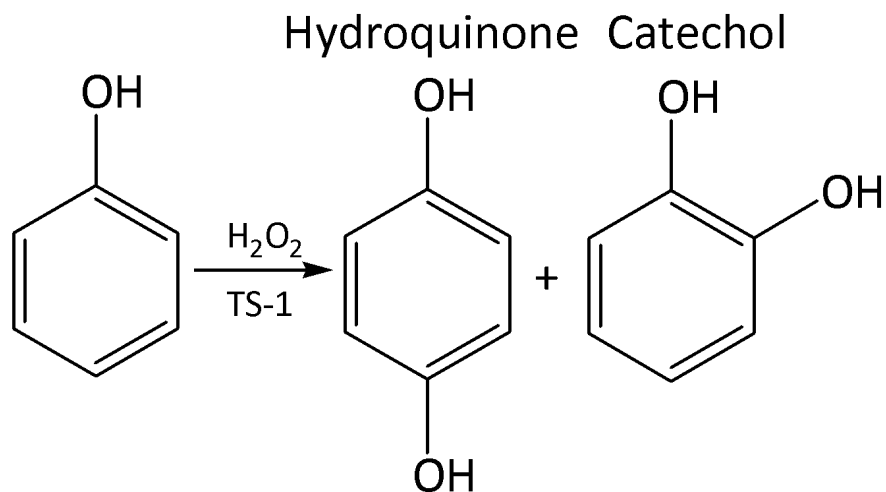
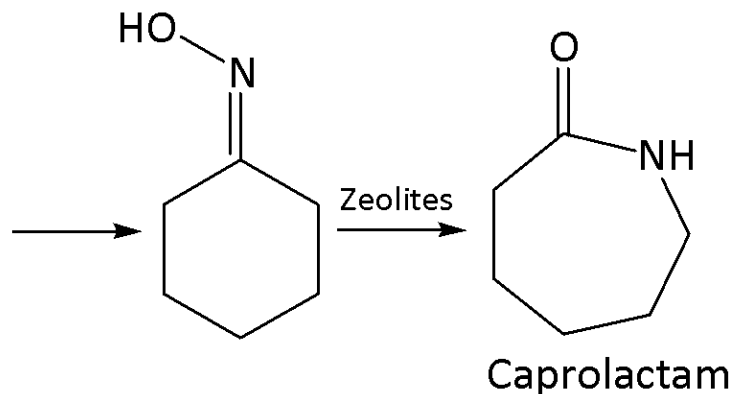
Yield = 98 %

**Использование диметилкарбоната в качестве
карбонилирующего агента**

Гетерогенный катализ и «зеленая» химия

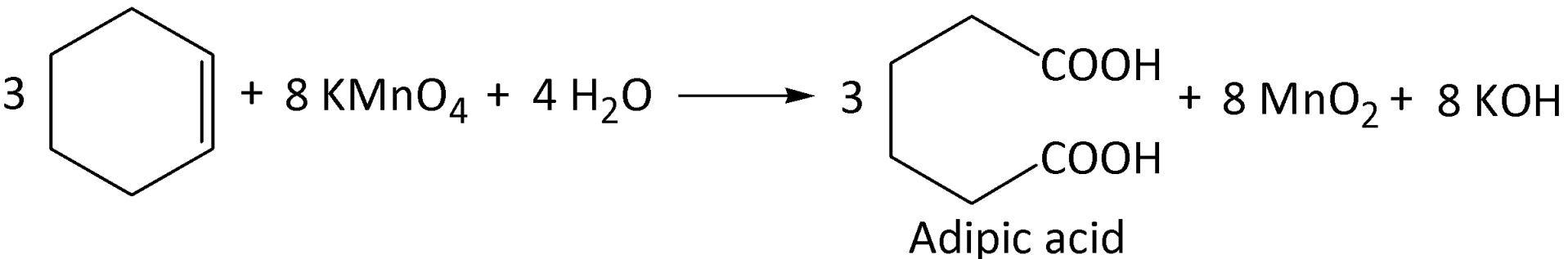


**Производство
о
капролактама**

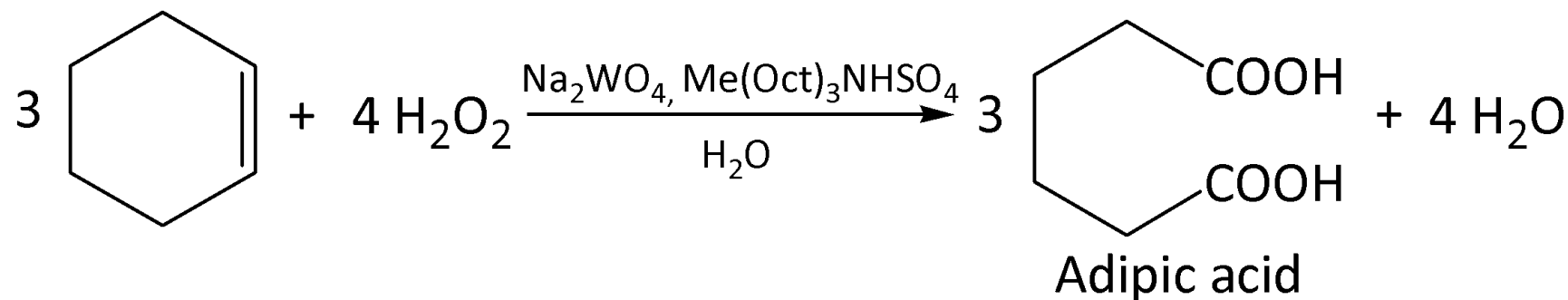


**Производство
гидрохинона**

Зеленые растворители: Вода

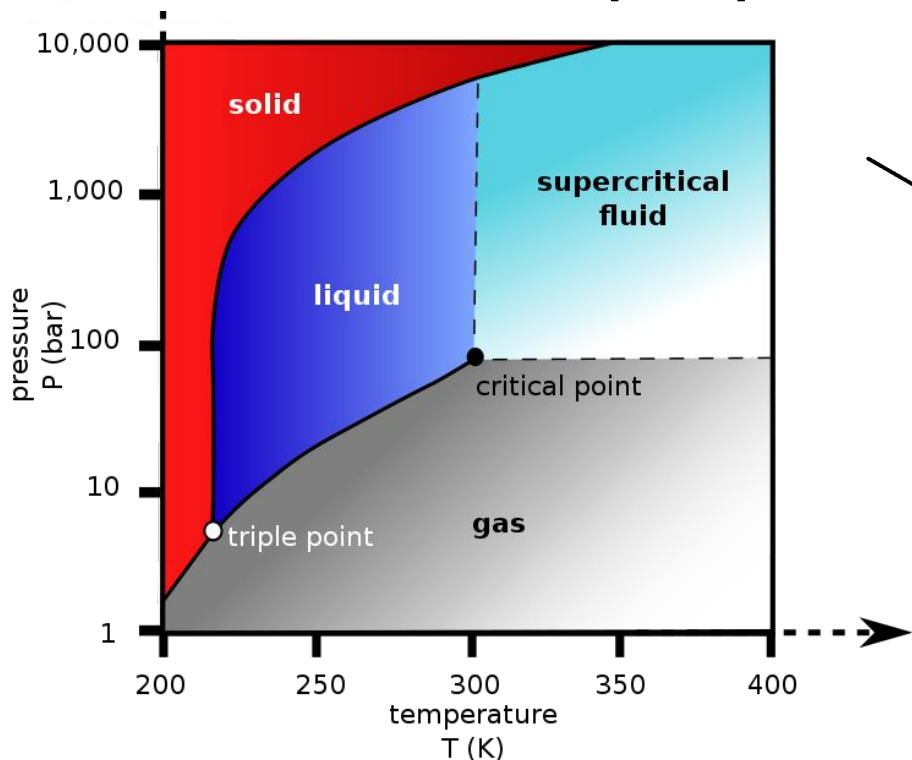


Синтез адипиновой кислоты окислением циклогексена перманганатом калия

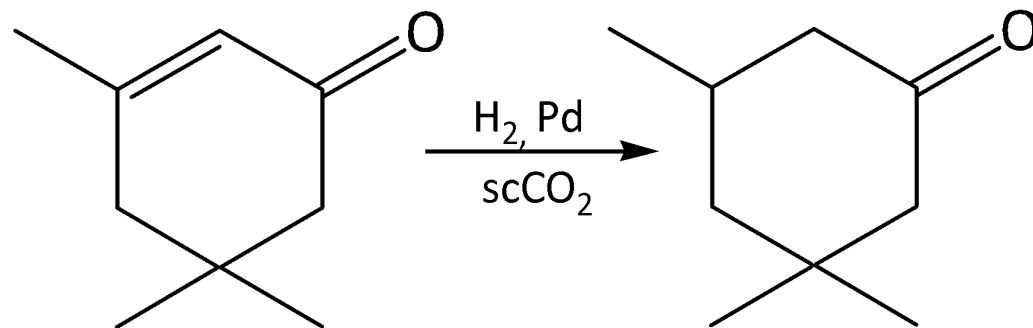


Синтез адипиновой кислоты окислением циклогексена пероксидом водорода

Зеленые растворители: Сверхкритический диоксид углерода



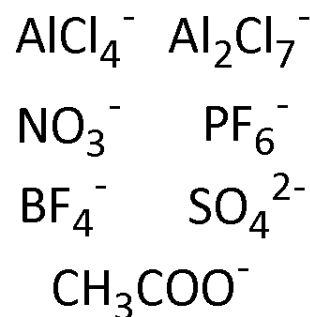
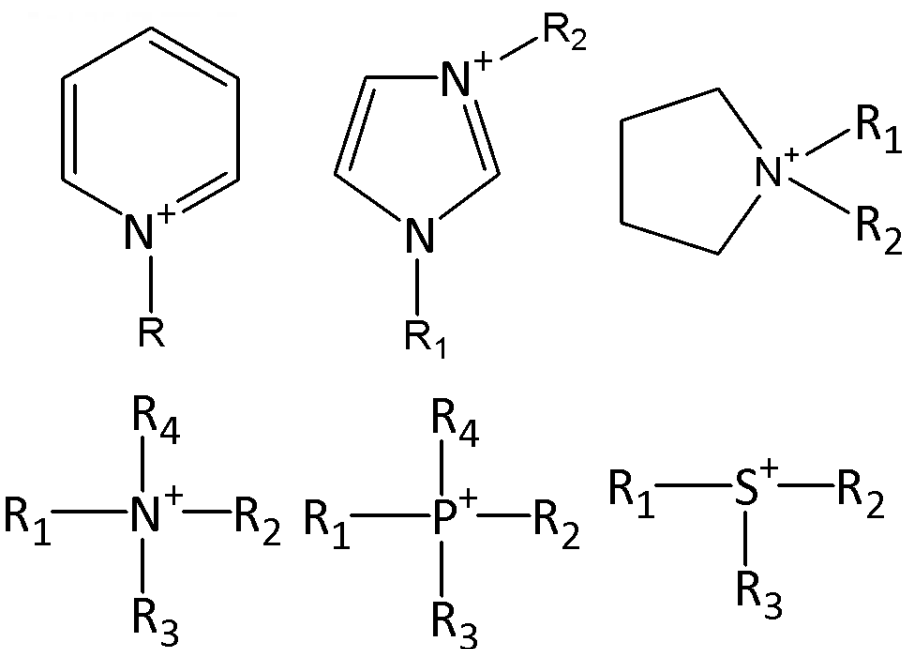
Фазовая диаграмма
CO₂



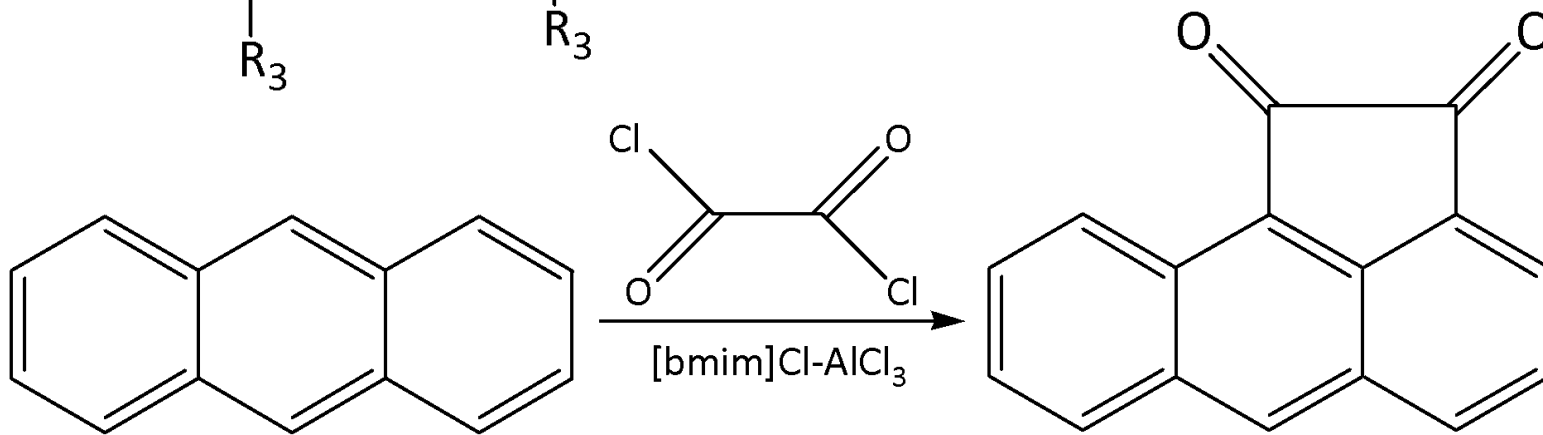
Синтез триметилциклогексанона
гидрированием изофорона

Применение scCO₂: растворитель; сверхкритическая флюидная экстракция; вспенивающая добавка; хроматография; стерилизация медицинских инструментов и др.

Зеленые растворители: Ионные жидкости



**Компоненты
ионных жидкостей**



**Ацилирование
оксалилхлоридом**

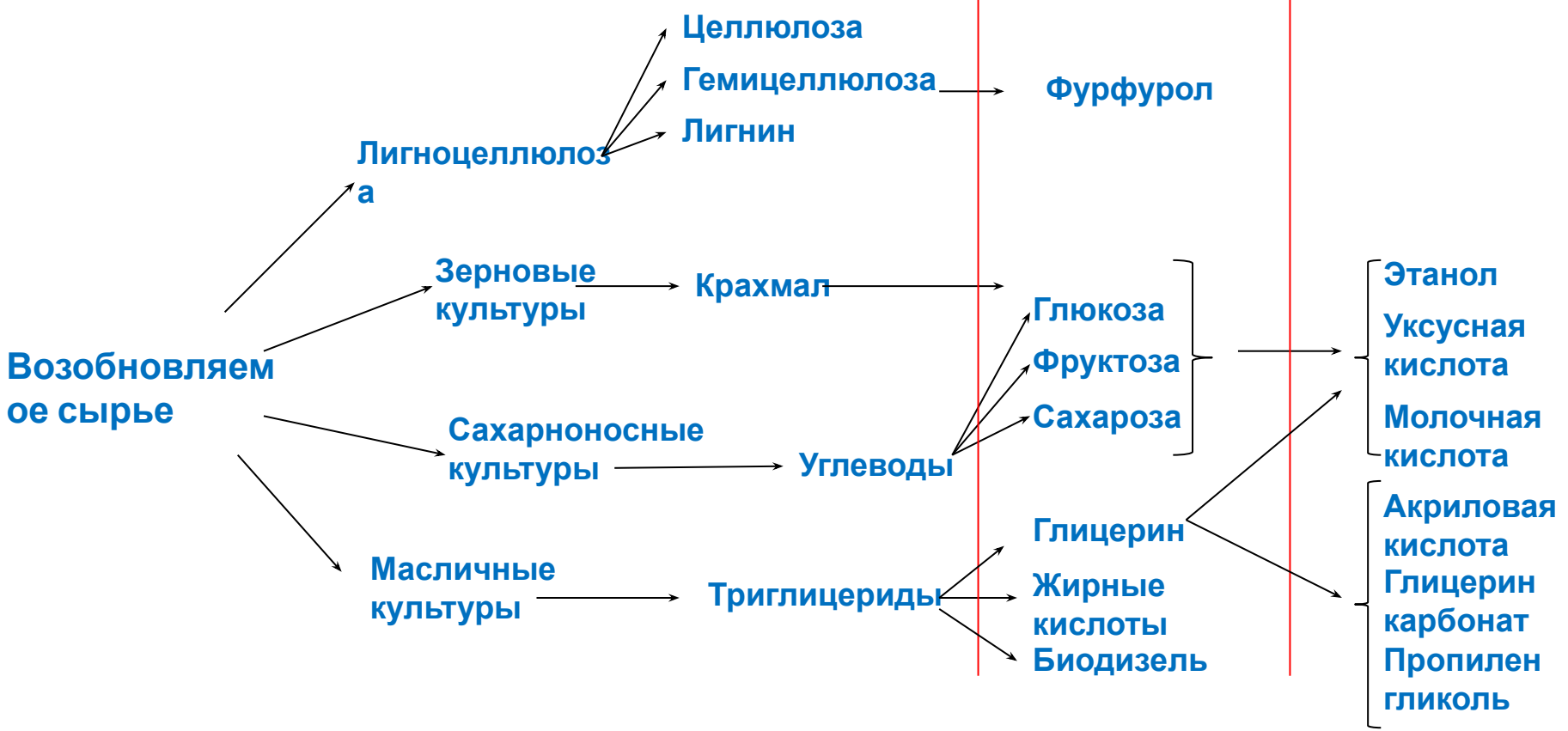
антрацена



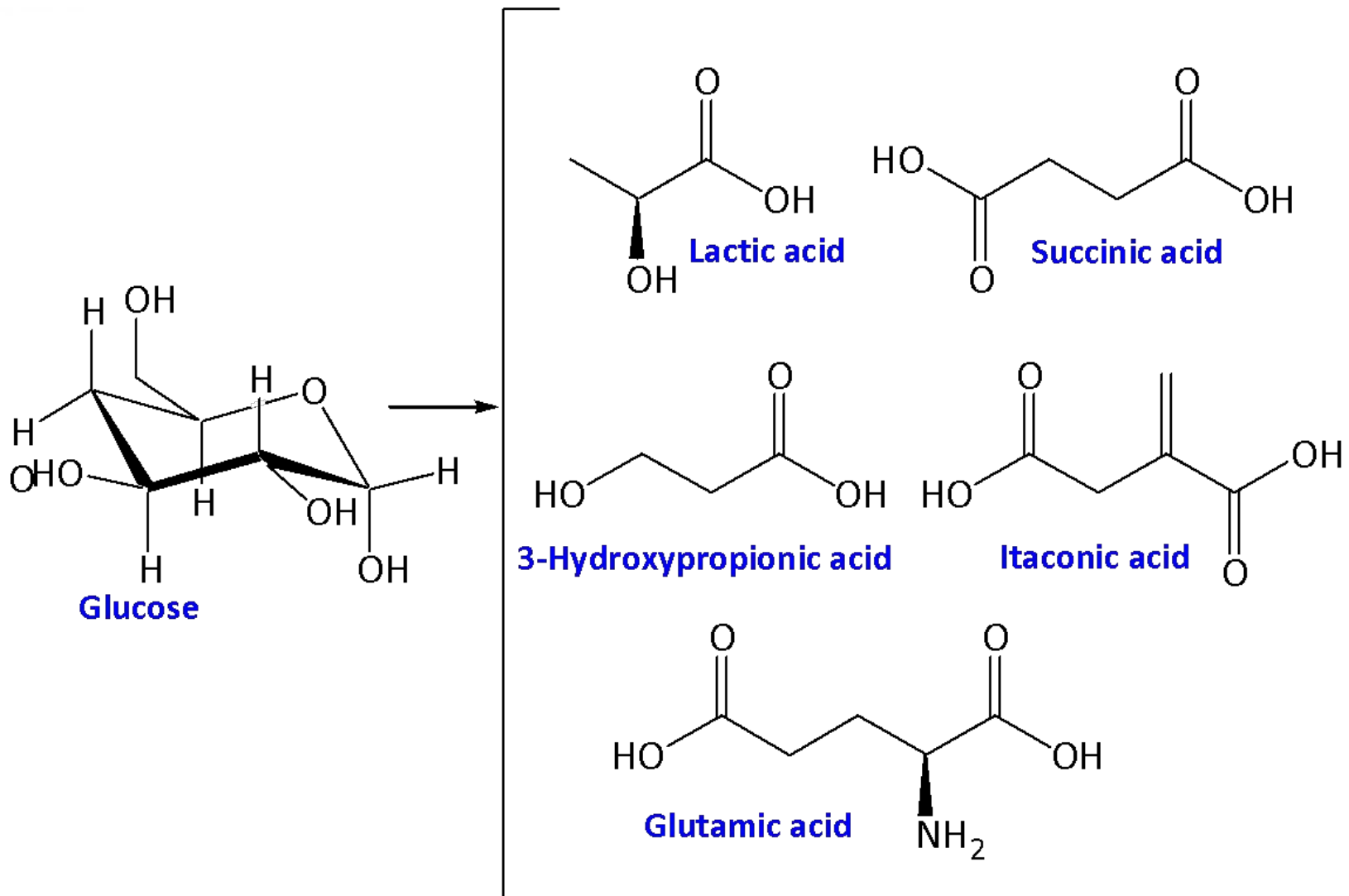
Использование возобновляемого сырья для получения важных химических веществ

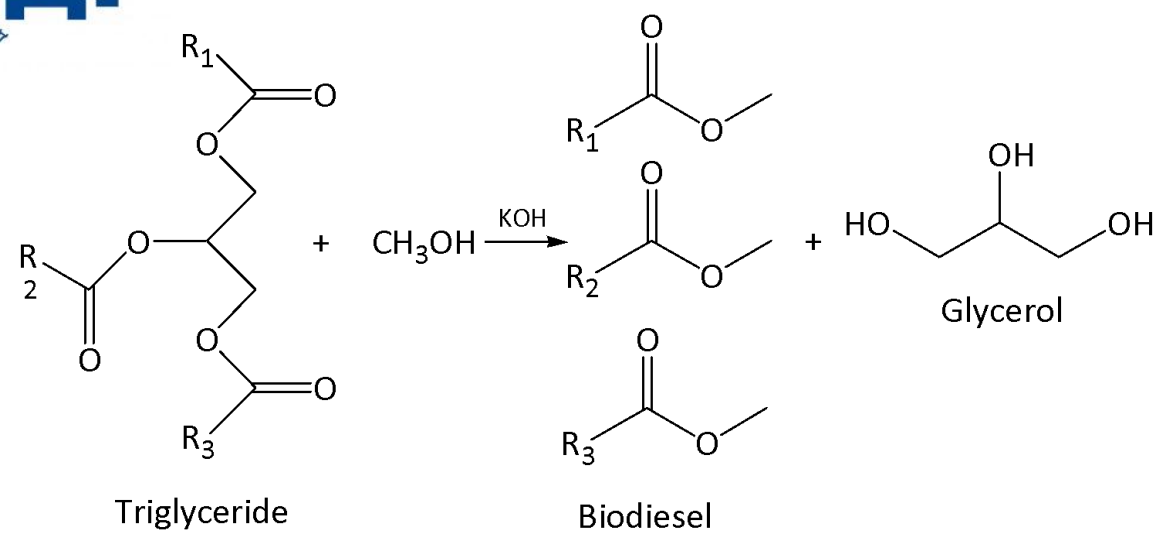
Первичная обработка

Первичное превращение / Последующее превращение

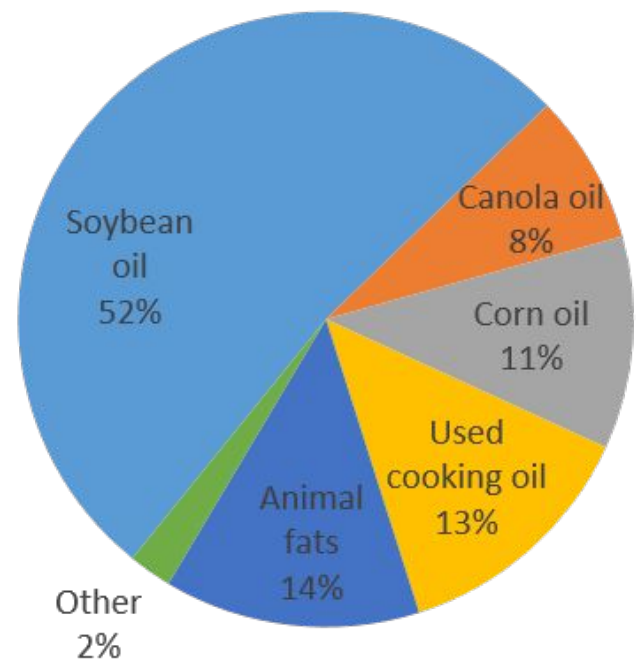


Продукты ферментации глюкозы





Получение биодизеля переэтерификацией триглицеридов жирных кислот



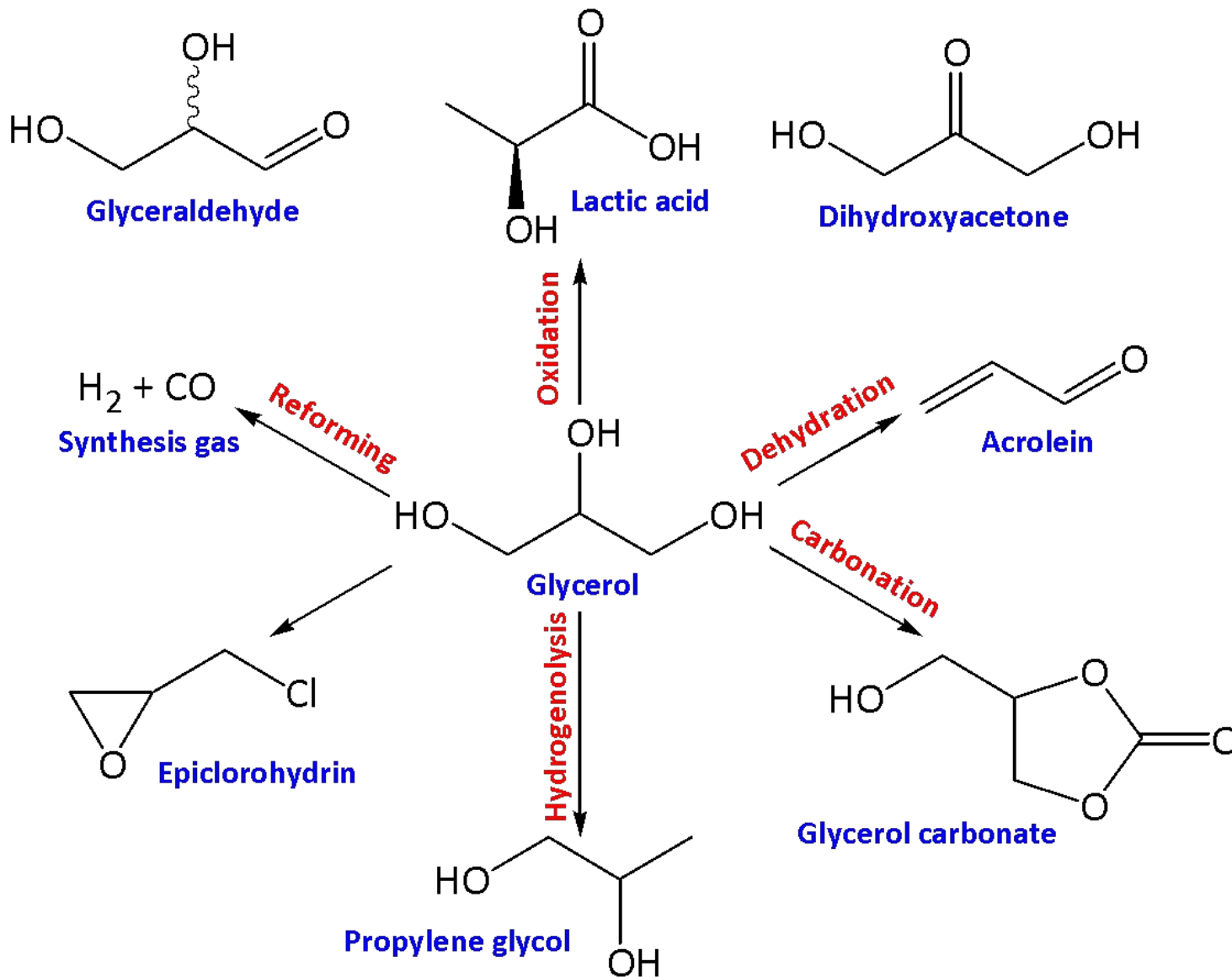
Наиболее распространенные растительные масла, используемые при производстве биодизеля



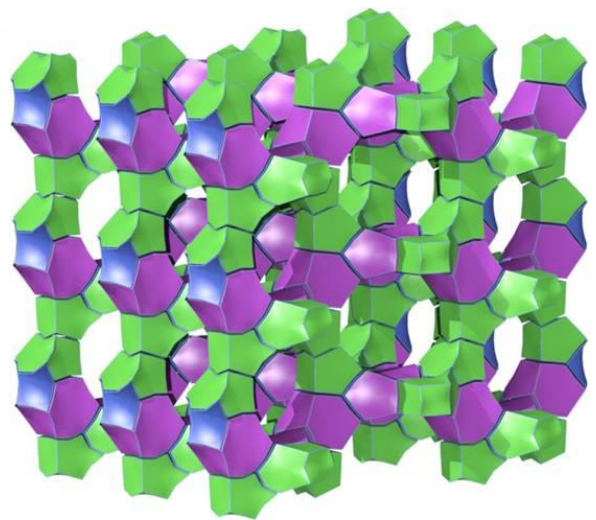
Объем производства глицерина в различных отраслях промышленности

Сектор промышленности	Объем производства глицерина, тыс. тонн в год							
	1992	1995	1999	2003	2005	2006	2008	2015
Мыловарение	208	208	198	188	167	146	125	83
Производство жирных кислот	271	292	313	333	396	438	479	521
Производство биодизеля	0	42	42	167	375	521	1125	1583
Производство жирных спиртов	83	104	125	104	125	167	250	250
Суммарный объем производства	676	729	781	917	1125	1271	2000	2458

Новые способы использования глицерина



Использование гетерогенного катализа в промышленных процессах «зеленой» химии



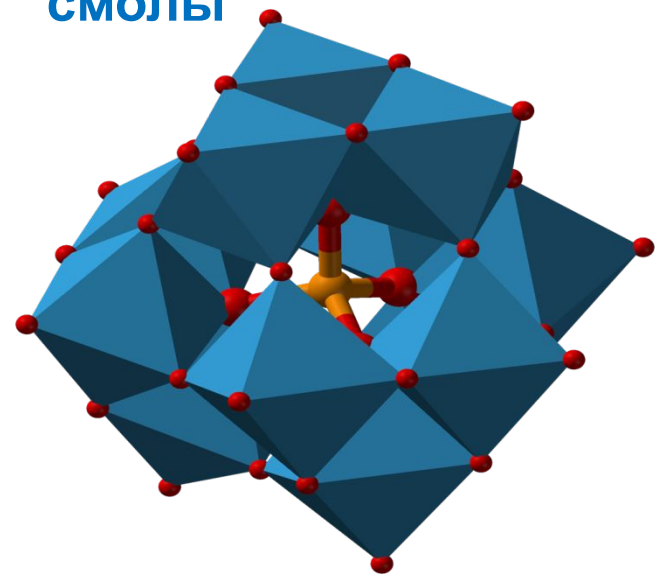
Цеолит



**Ионообменные
смолы**

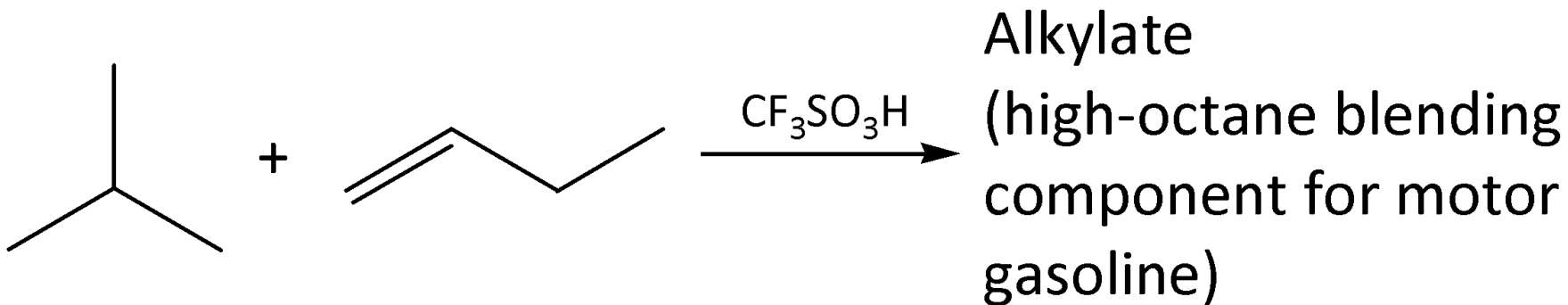


Оксиды металлов



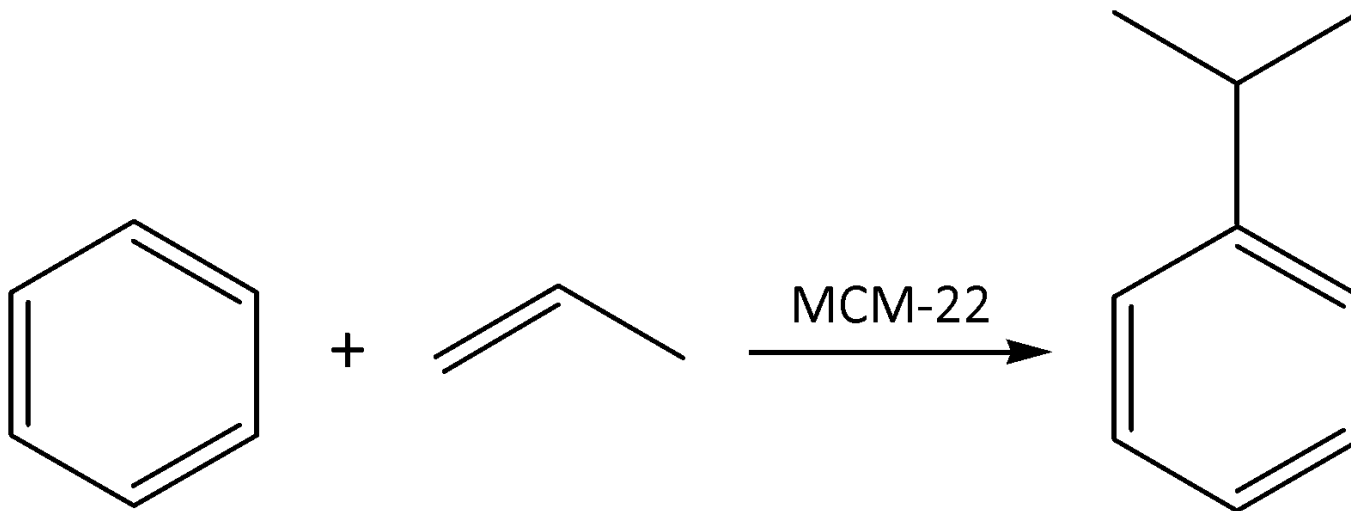
Гетерополикислоты

Получение высокооктановых компонентов моторных топлив (Haldor-Topsoe Alkylation Process)



- ✓ В **классическом процессе алкилирования** катализатором является плавиковая или серная кислота. HF очень токсичен, а серная кислота более дорогая по сравнению с плавиковой.
- ✓ Компания Haldor-Topsoe разработала **новую технологию алкилирования** с неподвижным слоем катализатора (**нанесенная «суперкислота» – трифторметансульфоновая кислота**). Конверсия исходного сырья составляет 100%. Состав алкилата – 80% октанов, остальное – углеводороды C5, C6, C7 и C9.

Получение кумола (Mobil-Badger Cumene Process)



✓ Кумол **традиционно получают** с использованием твердой фосфорной кислоты или трихлорида алюминия. Оба этих катализатора характеризуются низкой экологичностью. Например, твердая фосфорная кислота приводит к коррозии оборудования и не обладает высокой стабильностью.

✓ Компания **Mobil** разработала новый **цеолит MCM-22**, характеризующийся высокой активностью в процессе получения кумола. Катализатор, в отличие от нанесенной фосфорной кислоты и трихлорида алюминия, является экологически безвредным, не требует специальной обработки, может быть легко удален из реактора и регенерирован. Чистота получаемого кумола составляет 99,97% и выше.