

ЛЕКЦИЯ 10 ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ БАВ

Восстановлением называют процесс, в результате которого атом или группа атомов приобретают электроны. Наоборот, **окисление** заключается в потере электронов.

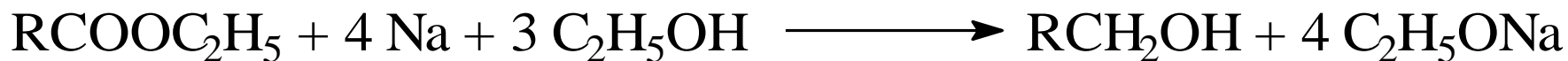
Многочисленные методы восстановления и окисления можно разделить на **четыре группы**: *химические, каталитические, электролитические и биохимические (микробиологические)*. Все эти методы находят широкое применение в фармацевтической промышленности.

ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ можно разделить на несколько групп по **типу восстановителя**.

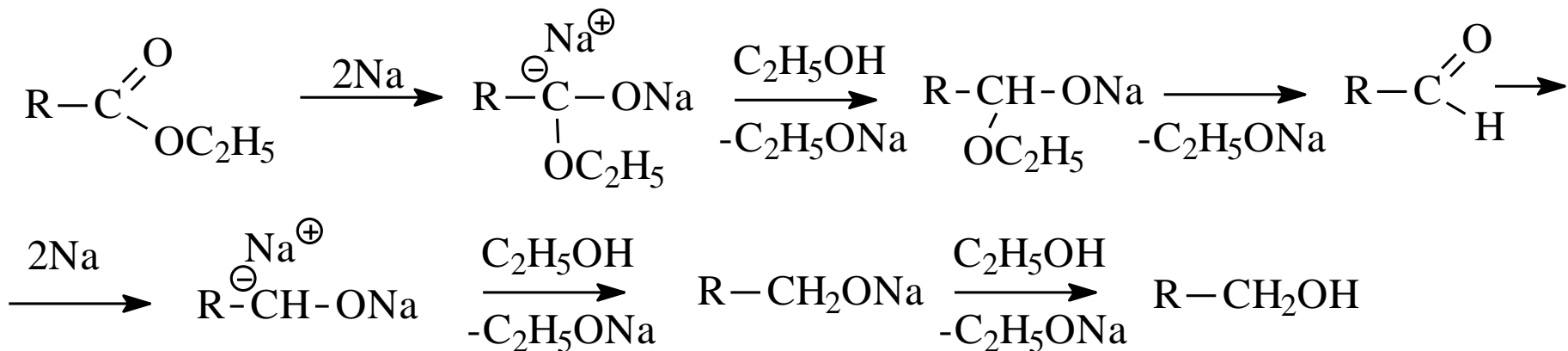
1.1. Восстановление натрием

А) Восстановление натрием в спирте (по Буво - Блану) *используется* для восстановления **сложных эфиров карбоновых кислот** до соответствующих спиртов. Наибольшее значение метод имеет в синтезе высших алифатических спиртов, получить которые другим путем трудно. У многоосновных кислот **восстанавливаются только этерифицированные карбоксильные группы.**

Суммарное **уравнение реакции** имеет вид:



Механизм восстановления можно представить следующим образом:



Выход целевых продуктов **не превышает 80%**. Потери обусловлены непосредственной реакцией между натрием и спиртом. Выделяющийся водород неактивен, а образующиеся алкоголяты вызывают конденсацию и переэтерификацию.

Методика восстановления **по Буво и Блану простая,**
но опасная.

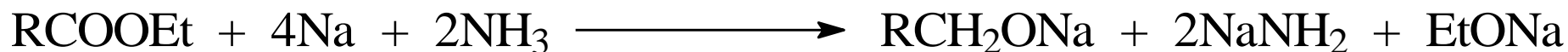
К кипящей смеси сложного эфира и пятикратного количества абсолютного спирта порциями добавляют кусочки металлического натрия, взятого в небольшом избытке.

После загрузки всего натрия и необходимой выдержки, реакционную массу выливают в воду для разложения образовавшихся алкоголятов. Спирт отгоняют, а продукты реакции извлекают экстракцией.

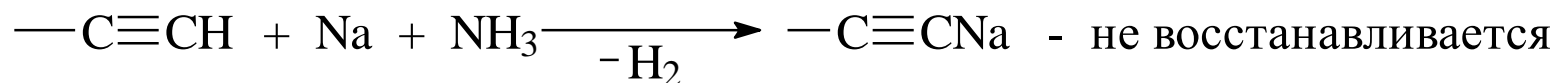
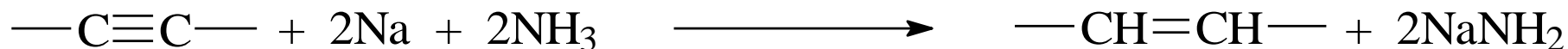
Отвод тепла является сложной технической проблемой, т.к. тепловой эффект реакции очень высок (**520 кДж/моль**). Необходимо обязательно использовать хорошо действующий (эффективный) обратный **холодильник**.

Б) Восстановление натрием в жидком аммиаке - применяется **для восстановления:**

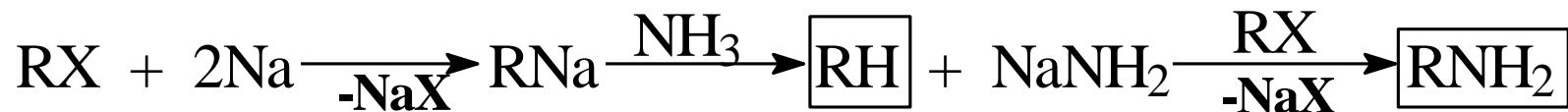
а) **сложных эфиров** до спиртов (лучше, чем по методу Буво-Блана)



б) **алкинов** до олефинов (при этом тройная связь на конце цепи не восстанавливается)



в) **органических галогенидов**, которое идет в двух направлениях:



Механизм аналогичен механизму восстановления по Буво-Блану

Щелочные металлы (калий, натрий и литий) хорошо растворяются в аммиаке и позволяют работать **в широком интервале концентраций**. Низкая степень диссоциации аммиака делает возможным восстановление соединений, которые гидролизуются в воде. Аммиак с натрием может образовывать амид, но в отсутствие катализаторов и при наличии соединений, способных восстанавливаться, этот процесс практического значения не имеет.

Для ведения процесса необходима **специальная аппаратура**, т.к. температура кипения аммиака очень низка ($-33,5^{\circ}\text{C}$). При более высокой температуре реакцию проводят **в автоклаве**. Для достижения гомогенности смеси необходимо энергичное **перемешивание**.

В) Восстановление амальгамой натрия

(раствором натрия в ртути)

Амальгама натрия не только раствор натрия в ртути. Ртуть образует со щелочными и щелочноземельными металлами **меркуриды** MeHg_x (например, **NaHg_2 , KHg_2 , MgHg**).

Амальгама, содержащая меньше **1,25% натрия**, при комнатной температуре **жидкая**. При более высокой концентрации натрия амальгама при комнатной температуре становится **твердой** и ее можно измельчать механически.

Процесс **растворения натрия в ртути** ведут под слоем толуола и в атмосфере азота, чтобы предохранить теплую амальгаму от воздействия кислорода воздуха.

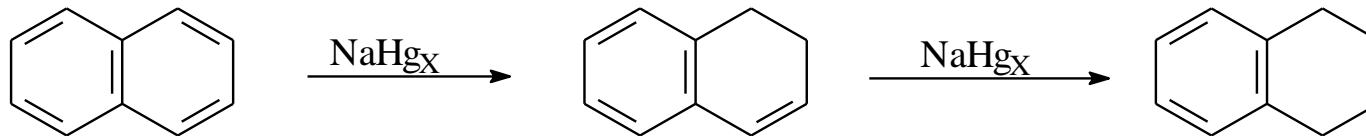
Процесс растворения натрия в ртути является **экзотермичным**. Отвод тепла реакции вызывает определенные трудности, т.к. использование воды в качестве хладагента исключено. Обычно получение амальгамы проводят при 40-50°C, получая таким образом **2-3%-ую амальгаму**.

Амальгамой натрия восстанавливают:

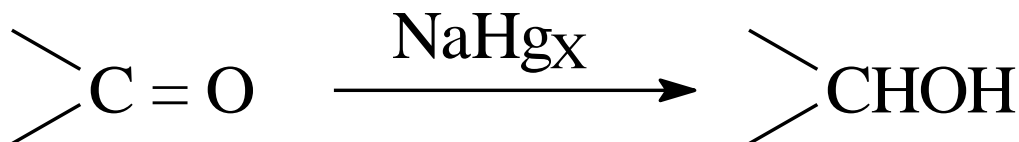
а) сопряженные двойные связи (но не изолированные)



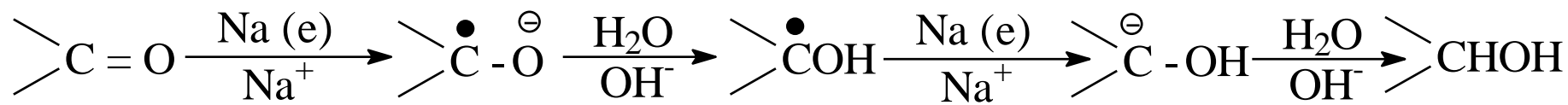
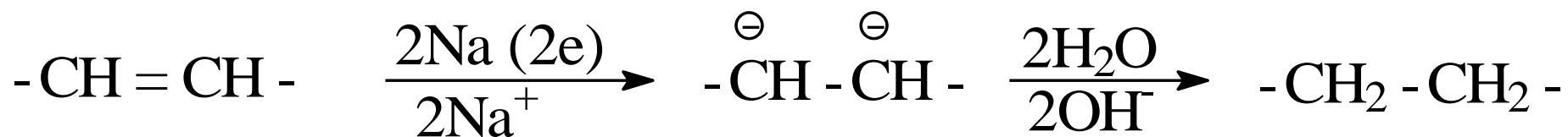
б) отдельные представители аренов, например, фталевые кислоты, ароматические полициклические углеводороды (до ди- или тетрагидропроизводных).



в) карбонильную группу в альдегидах и кетонах до соответствующих спиртов (очень легко!).



Механизм восстановления амальгамой натрия - **ионный**. В адсорбционном слое на поверхности металла к молекуле субстрата присоединяются один или два электрона. Затем образующиеся анионные радикалы или двухзарядные анионы соединяются с протонами:



Методика восстановления: субстрат растворяют или суспендируют в *спирте или воде*, т.к. амальгама натрия реагирует с водой медленно. Для ускорения реакции в некоторых случаях применяют *органические растворители*, смешивающиеся с водой и спиртом, для лучшего растворения субстрата, или *эмульгирующие средства*.

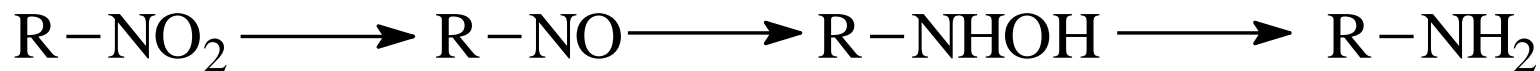
К смеси постепенно добавляют избыток амальгамы (25-40% от теоретического). После полного разложения амальгамы, выделившуюся ртуть отделяют декантацией и промывают водой или спиртом.

Скорость, а иногда и состав продуктов восстановления зависят **от величины рН**, которая по ходу реакции повышается (-ОН), при этом скорость реакции замедляется. Точный и непрерывный контроль значения рН осуществляют потенциометрически. Величину рН регулируют пропусканием CO_2 .

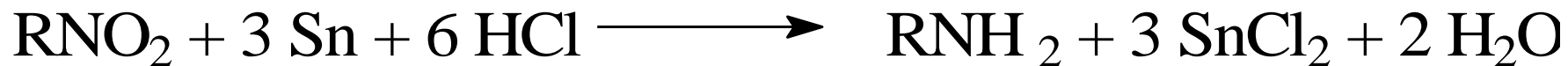
1.2. Восстановление оловом и хлоридом олова (II)

—восстанавливают: **нитро-, нитрозо-, гидроксиамино-, азо- и диазо групп.** Он широко применяется в лабораторной практике, но не в промышленности (по экономическим соображениям).

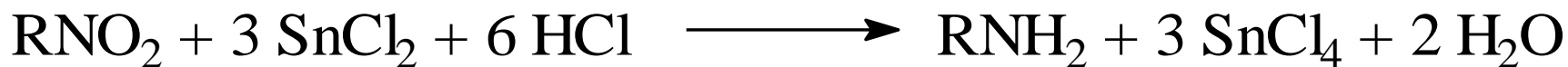
А) Восстановление оловом особенно удобно для превращения **ароматических нитросоединений** (а также **нитрозосоединений** и **алкилгидроксиламинов**) в **амины**, которые находят широкое применение в качестве промежуточных соединений при синтезе фармацевтических препаратов. Восстановление протекает **ступенчато** через ряд промежуточных соединений:



Уравнение процесса:



Образующийся первоначально хлорид олова (II) может взаимодействовать с нитросоединениями в качестве восстановителя:



Методика К раствору или суспензии *нитросоединения* в концентрированной соляной кислоте, взятой в небольшом избытке, добавляют порциями гранулированное олово. Реакцию начинают, осторожно нагревая на водяной бане реакционную смесь после загрузки первой порции олова.

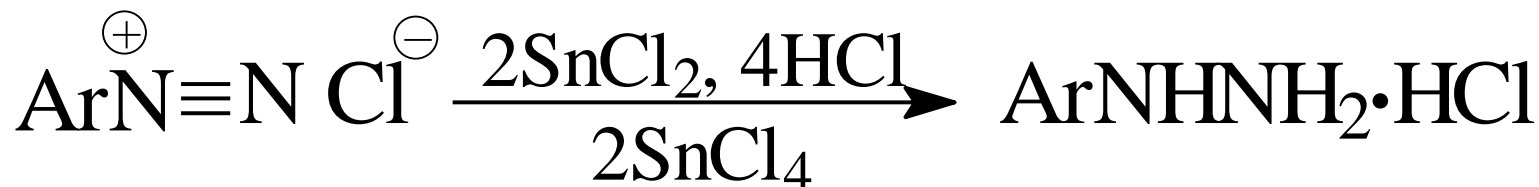
Если загрузить много олова, реакция начнется слишком бурно и потребуются быстрое охлаждение реакционной массы для предотвращения ее выброса. Реакцию, как правило, ведут, поддерживая спокойное кипение реакционной массы (обратный холодильник) до получения прозрачного раствора.

Затем быстро фильтруют горячий раствор от не прореагировавшего олова через фильтр, устойчивый к действию соляной кислоты.

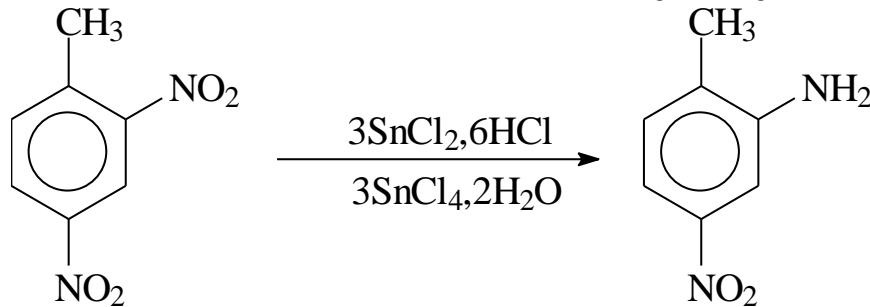
Фильтрат, содержащий амин в виде комплексной соли с хлоридами олова, подщелачивают аммиаком или щелочью. Если продукт реакции перегоняется с водяным паром, то его отгоняют прямо из реакционной массы. В других случаях амин экстрагируют подходящим растворителем.

Б) Восстановление хлоридом олова (II) позволяет оказать *более сильное и специфическое* восстанавливающее действие и часто дает лучшие результаты, чем восстановление металлическим оловом.

Хлорид олова (II) **восстанавливает нитро- и азосоединения** до аминов, **соли диазония** до арилгидразина, **избирательно** восстанавливает **нитрогруппы** в полинитро-, гетероциклических и галогеннитросоединениях:



Наиболее отчетливо **избирательность** восстановления проявляется в трехзамещенных производных бензола с двумя нитрогруппами в положениях 2 и 4 относительно третьего заместителя. Так, в 2,4-динитротолуоле хлорид олова восстанавливает нитрогруппу в положении 2, практически не затрагивая нитрогруппу в положении 4.

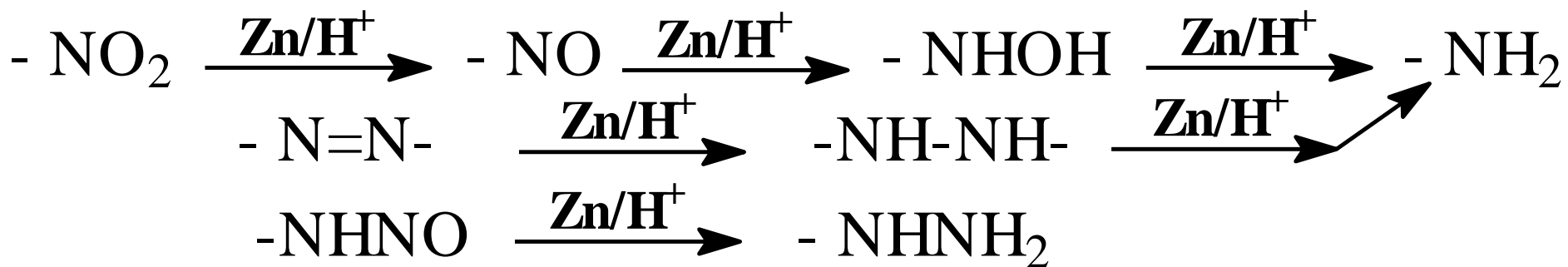
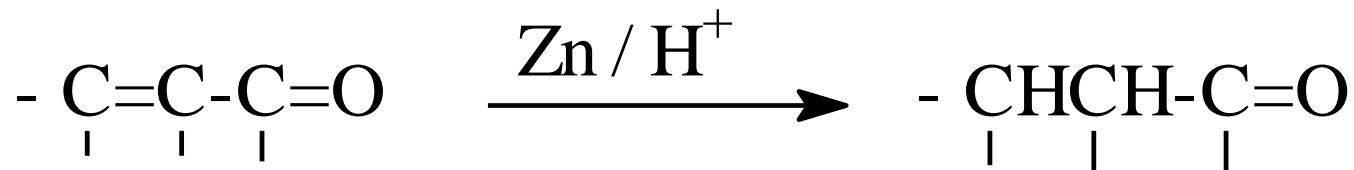
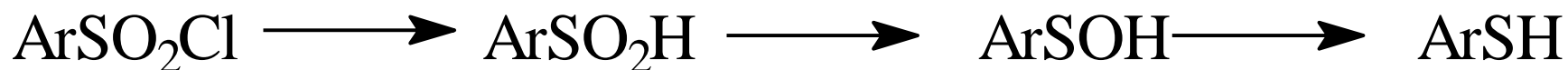


Восстановление **в гомогенной среде**, т.к. хлорид олова растворяется в воде и в этиловом спирте. Благодаря этому восстановление идет быстро, с хорошими выходами и при низких температурах, хотя реакцию можно вести и при температуре кипения. Метод не вызывает особых затруднений. Порядок загрузки реагентов особой роли не играет.

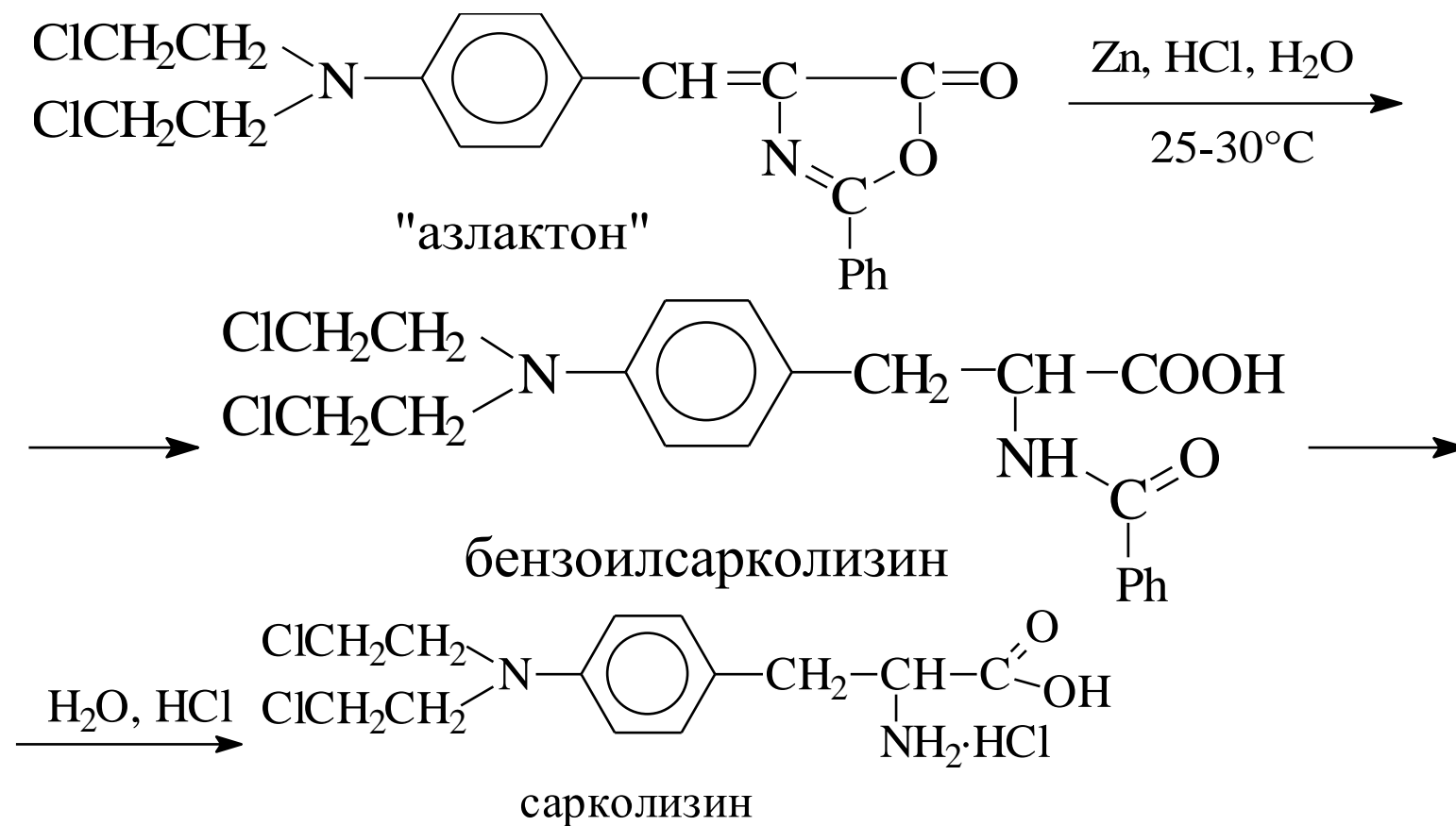
1.3. Восстановление цинком

Восстановление цинком в промышленности проводят как в кислой, так и щелочной среде. Для восстановления используют также амальгаму цинка.

А) Цинк в кислой среде восстанавливает:
карбонильные соединения до спиртов,
аренсульфохлориды до тиофенолов, **двойную связь** в α,β -ненасыщенных карбонильных соединениях, однако **практическое значение имеет лишь восстановление нитро-, нитрозо- и других азотсодержащих групп – до соответствующих аминов.**

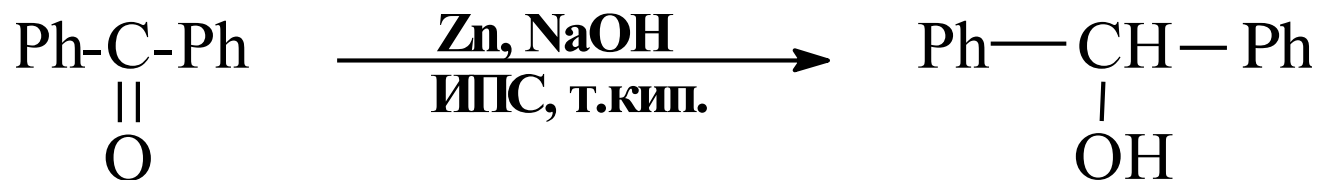


Примеры В синтезе *сарколизина* цинковой пылью в солянокислой среде восстанавливают "азлактон", после чего образующейся бензоилсарколизин гидролизуют:



**Б) Цинк в щелочной среде
восстанавливает:**

а) карбонильные соединения до спиртов



б) галогенопроизводные в углеводороды



в) нитроарены в азо-, гидразосоединения и далее в амины:



При получении гидразосоединений обычно используют **цинковую пыль**, которая обладает большой удельной поверхностью, и загружают её на 10-15% больше теоретически рассчитанного количества. **Едкий натр** в реакции практически **не расходуется**, т.к. образующийся цинкат в условиях реакции гидролизуется, давая гидроксиды цинка и натрия. Поэтому щелочи берут в 5-100 раз меньше, чем необходимо по теории



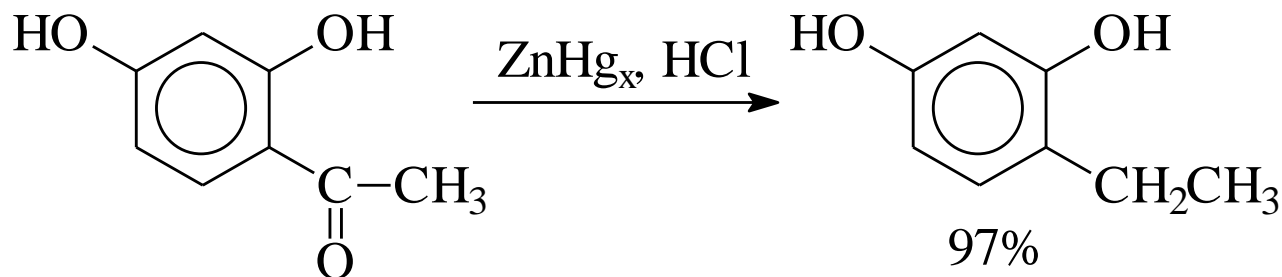
Высокая **концентрация щелочи** может привести к образованию амина наряду с гидразосоединением. Однако при недостаточной щелочности восстановление идет вяло.

Поэтому процесс разделяют на **две стадии**. Сначала ведут восстановление в концентрированной щелочи при 80-90°C до образования азокси- и азосоединений, причем цинковую пыль и щелочь строго дозируют. Затем образовавшиеся соединения восстанавливают новой порцией цинковой пыли, но уже в разбавленном растворе щелочи при 65-70°C.

При восстановлении **контролируют** температуру, pH среды и окраску раствора. Образующиеся в процессе восстановления азосоединения имеют интенсивную окраску, а при дальнейшем восстановлении они дают неокрашенные гидразосоединения. Реакцию прекращают сразу **после обесцвечивания раствора**, так как дальнейшее восстановление может привести к появлению аминов в реакционной массе.

Гидразосоединение выпадает в виде осадка вместе с гидроксидом цинка. Гидроксид растворяют осторожным подкислением реакционной массы до нейтральной реакции и **гидразосоединение отфильтровывают**.

В) Амальгама цинка в соляной кислоте (**метод Клемменсена**) замещает **кислород карбонильной группы** двумя атомами водорода:

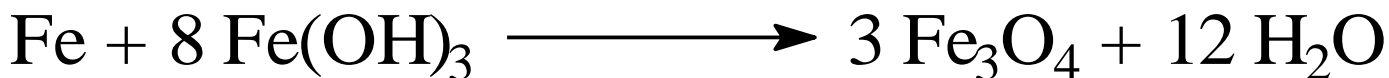
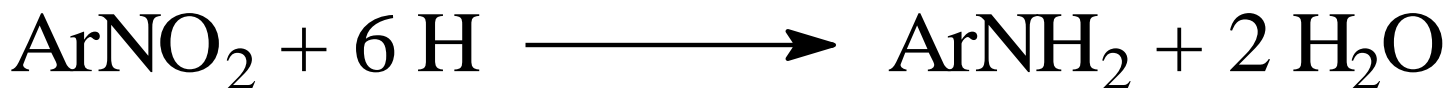
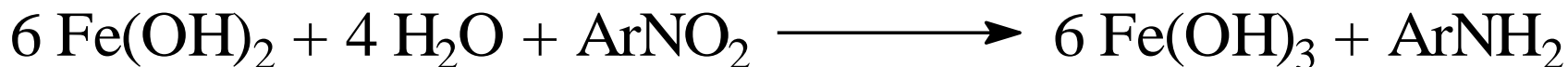
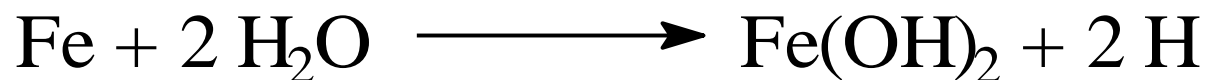


Реакция проходит при нагревании в **водно-спиртовых средах**, в некоторых случаях в среде уксусной кислоты или в инертных растворителях.

Гидроксисоединения в этих условиях не восстанавливаются, что свидетельствует о том, что восстановление СО-группы проходит не через стадию образования спирта

1.4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОМ

А) Железо в присутствии электролитов - **восстанавливает** **ароматические нитросоединения** до соответствующих **аминов** - одновременно протекает четыре **реакции**:

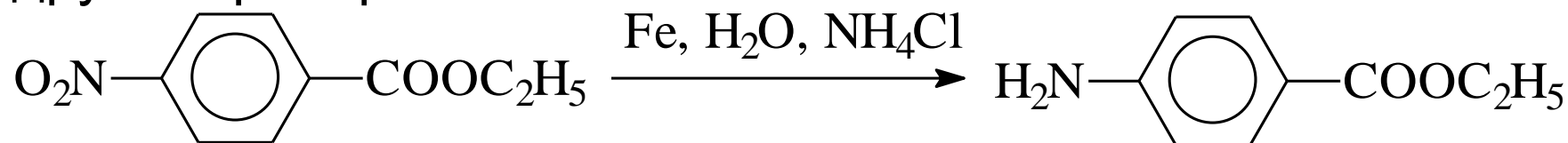


Скорость процесса восстановления лимитируется первой стадией, которая аналогична процессу влажной коррозии железа. Поэтому восстановление ведут в среде **электролита**, как правило, **в слабокислой среде**. При повышении величины **pH среды** скорость реакции уменьшается. При **pH > 12** процесс практически прекращается.

Электролиты вводят в реакционную массу в готовом виде (хлорид аммония) или получают в самом реакторе при протравливании чугуновой стружки соляной кислотой. Наиболее **активным** электролитом является хлорид аммония, **менее активным** хлорид железа (II), сульфат аммония и т.д.

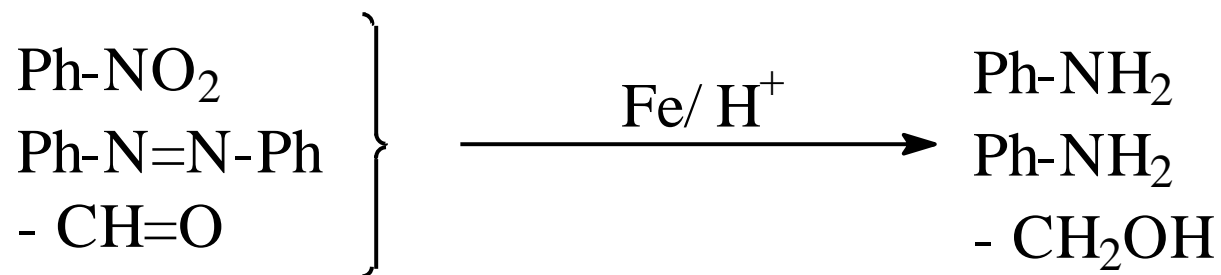
Для восстановления лучше всего использовать **стружку серого чугуна**, (отходы металлообрабатывающих производств). Его **активность** объясняется возникновением в присутствии электролитов гальванической пары на границе раздела: железо - графит.

Этот метод **используют** при производстве **анестезина, новокаина, дифенилсульфона** и ряда других препаратов:



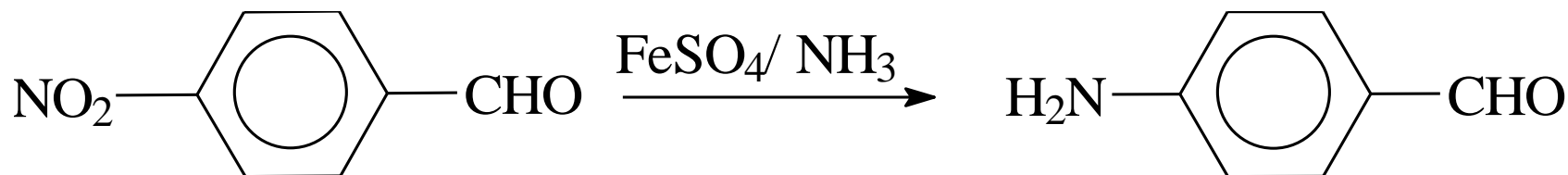
Достоинства метода: простота технологии, дешевизна сырья, высокий выход целевого продукта реакции. **Недостатки:** сокращение сырьевой базы и нестабильное качество чугунной стружки; трудности по утилизации образующегося шлама (фильтрация, транспортировка плохо фильтрующегося тяжелого и содержащего абразивные частицы осадка).

Б) Железные опилки в среде соляной или уксусной кислот - **восстанавливают нитросоединения, азосоединения и альдегиды.**



Процесс ведут при температуре кипения, медленно добавляя нитросоединение к суспензии железа в слабокислой водной или водно-спиртовой **среде**. Концентрация спирта может иметь большое значение. Наилучшие результаты получают при работе с **железом**, восстановленным водородом. Добавление небольшого количества **хлорида никеля** ускоряет реакцию.

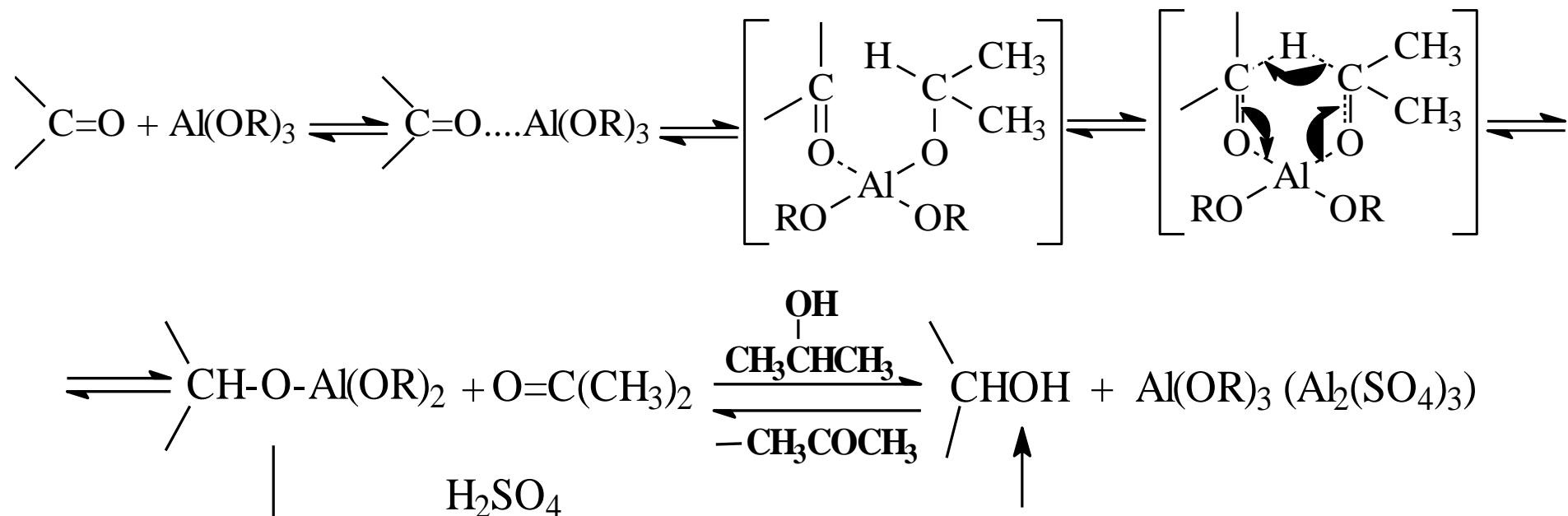
В) Сульфат железа (II) в присутствии аммиака
- **восстанавливает нитрогруппу** в молекулах соединений, содержащих и другие способные к восстановлению группы. Этот метод дает хорошие результаты при восстановлении ароматических нитрокарбоновых кислот и нитроальдегидов.



1.5. Восстановление алкоголятами алюминия (метод Меервейна-Понндорфа-Верлея)

ароматические и алифатические **карбонильные соединения** в соответствующие спирты, **не затрагивая** другие функциональные группы.

Схема реакции:

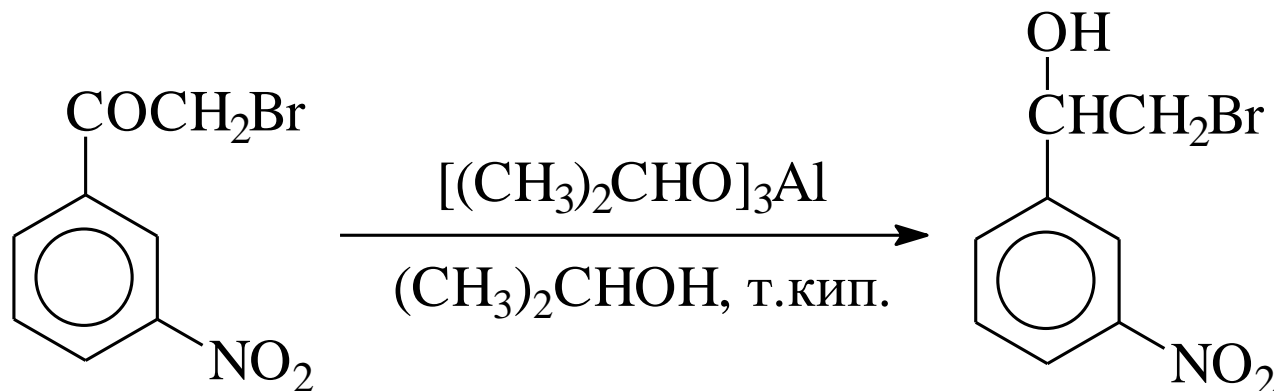
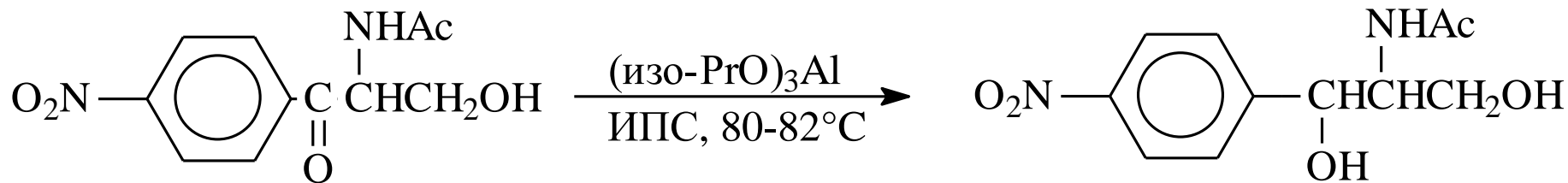


Для восстановления обычно используют **изопропилат алюминия** в изопропиловом спирте; реже – **этилат алюминия** в этиловом спирте (для восстановления альдегидов).

Восстановление идет **за счет спиртового радикала алкоголята**, который окисляется до карбонильного соединения. Образовавшийся новый алкоголят алюминия может подвергаться алкоголизу под действием растворителя, благодаря чему регенерируется изопропилат алюминия. Поэтому **алкоголяты** выполняют в основном роль **катализатора**. Однако лучшие результаты получаются при применении алкоголята **в количествах** 1 и более моль на моль субстрата.

Целевой продукт (спирт) **выделяют**, обрабатывая образовавшийся алкоголят алюминия разбавленной серной кислотой. **Выходы** целевых продуктов обычно составляют 80-95%.

Восстановление по **Меервейну-Понндорфу** используется при синтезе левомецетина, мезатона, фетанола и ряда других препаратов:

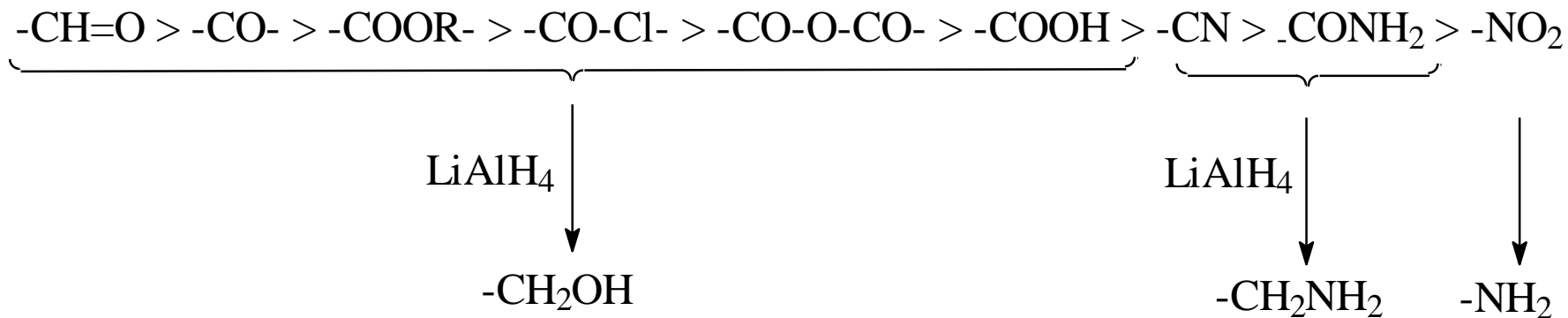


1.6. Восстановление гидридами металлов

обладают сильными восстановительными свойствами и используются для восстановления полярных соединений, имеющих двойные связи углерод - гетероатом.

А) Алюмогидрид лития – комплексное солеобразное соединение с формулой $\text{Li}^{\oplus}\text{AlH}_4^{-}$, которое медленно растворяется в эфирах с образованием новых комплексов – **эфиратов**.

Алюмогидрид лития **восстанавливает**:



Алюмогидрид лития восстанавливает практически все связи **углерод-гетероатом**, **но не двойные связи углерод-углерод**. Такая **селективность** позволяет восстановить функциональные группы в ненасыщенных углеводородах.

Алюмогидрид лития применяют:

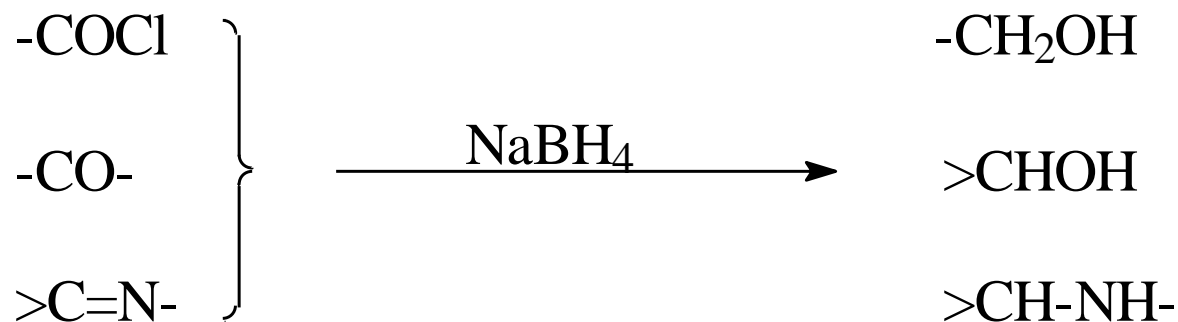
для восстановления **этилового эфира себаценовой кислоты** с лучшим выходом, чем в других методах (в синтезе противогрибкового препарата *декамин*):



Б) Боргидриды натрия (калия) являются менее активными реагентами, чем алюмогидрид лития, но восстанавливают в *таких полярных растворителях*, как вода, метанол, пиридин, ацетонитрил.

Они обычно **восстанавливают** только **хлорангидриды** кислот, **карбонильные** соединения и **основания Шиффа**.

Борогидриды натрия и калия широко используют для **избирательного восстановления** карбонильных групп в присутствии других функциональных групп и непредельных связей:



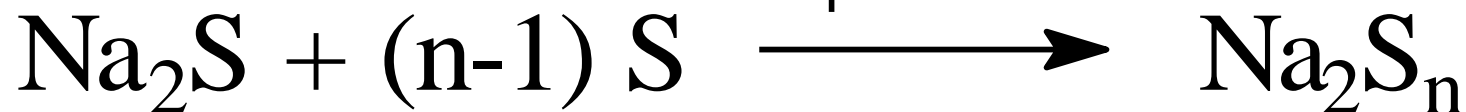
2. Восстановление соединениями серы

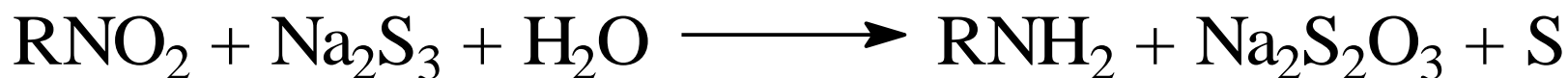
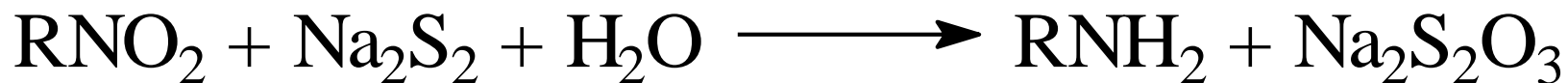
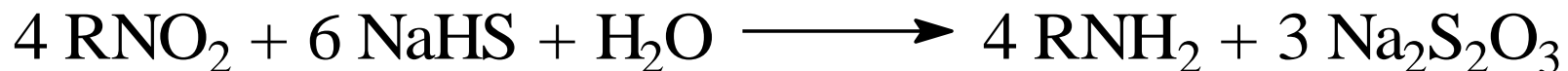
В промышленности **применяются редко**, т.к. имеются более удобные восстановители и вызывает серьезные трудности утилизация сточных вод, содержащих вредные соединения серы (сероводород), **(недостаток)**

2.1. Восстановление нитросоединений до аминов сульфидами щелочных металлов

Для этих целей **используют** - **сульфид** и **полисульфиды** натрия Na_2S_n ($n = 2, 3\dots$) и **гидросульфид** (сульфгидрат) натрия NaHS .

Полисульфиды (дисульфид, трисульфид...) натрия **получают** нагреванием раствора Na_2S с рассчитанным количеством серы:

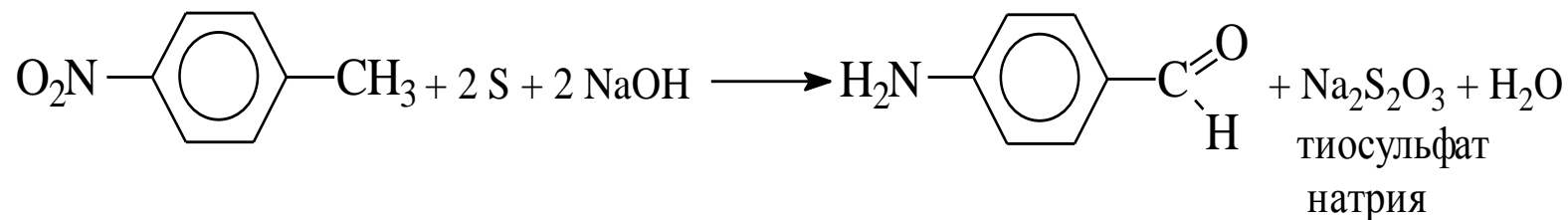




Методика восстановления. К нагретой до *температуры* 80-90°C или до кипения *эмульсии* или *суспензии* нитросоединения в воде постепенно, при *сильном перемешивании* приливают 15-25% раствор сульфида. *Избыток* сульфида должен составлять 20-40% (при полном восстановлении). *Длительность* восстановления сильно зависит от температуры и обычно составляет несколько часов.

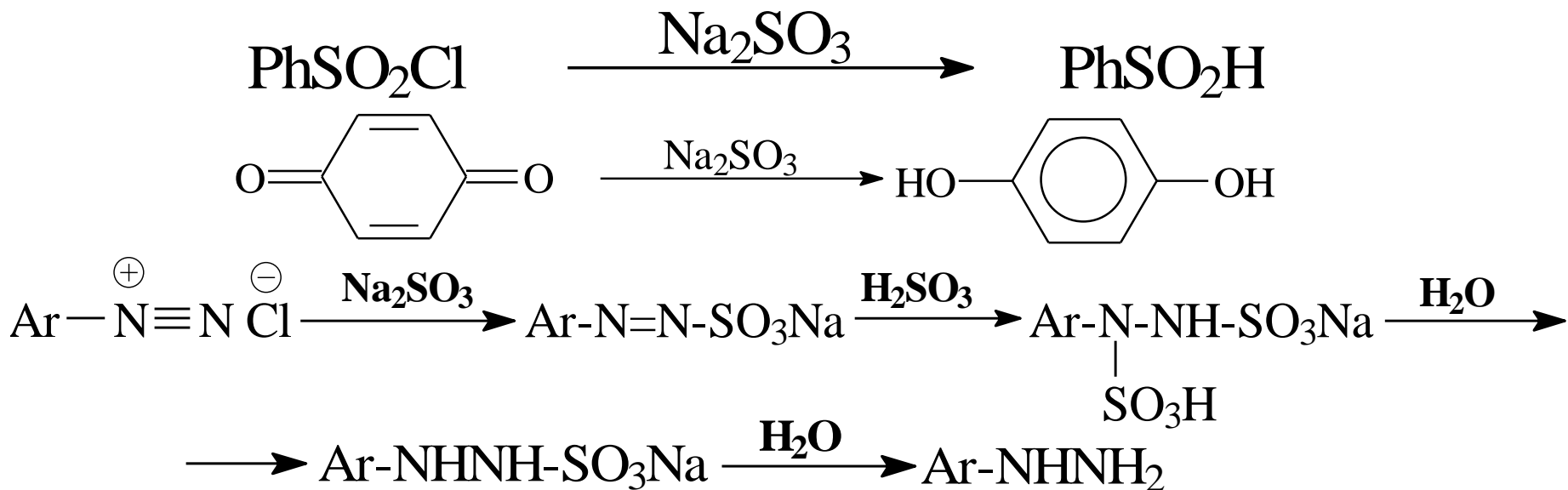
2.2. Восстановление нитрогруппы серой в щелочной среде.

Интересно тем, что в отдельных случаях (например, восстановление *p*-нитротолуола в производстве солютизона) проходит с одновременным окислением метильной группы до альдегидной:



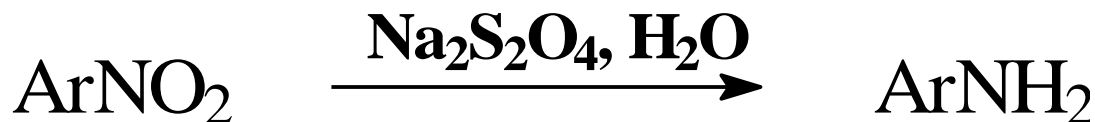
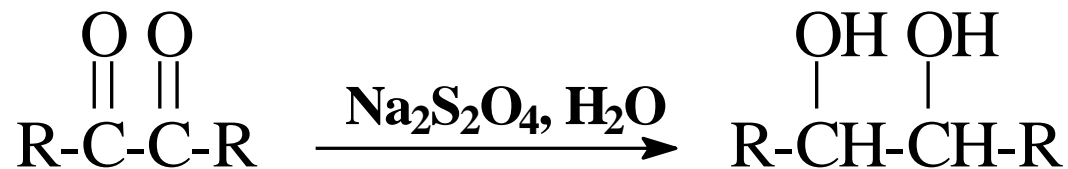
2.3. Восстановление сернистой кислотой и ее солями

Сернистая кислота и ее соли являются мягкими восстановителями в водных и органических средах и восстанавливают: а) **сульфохлориды** до соответствующих кислот; б) **хиноны** - до гидрохинонов; в) **нитрозосоединения** - до **аминосульфонов**; г) **восстановление солей диазония** до **арилгидразинов**:



2.4. Восстановление дитионитом натрия

Дитионистая кислота ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_4$) в свободном виде неустойчива и применяется в виде солей. Дитионит натрия **восстанавливает дикетоны** до гидроксипроизводных; **алифатические нитросоединения** – до **оксимов**, а **ароматические** – до **аминов**; а также очень легко и с высоким выходом **азосоединения до аминов**:

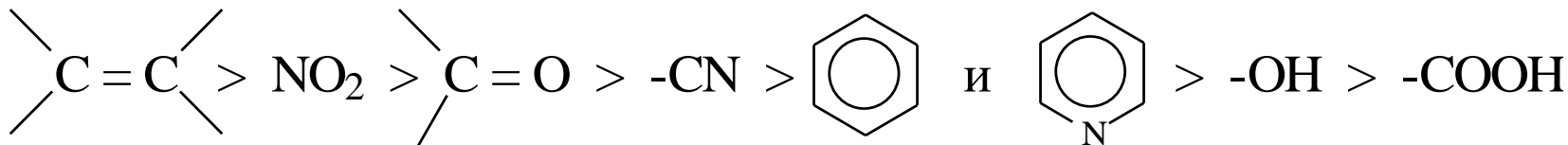


КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОДОРОДОМ

Достоинства 1)универсальность; 2)высокая скорость процесса; 3)чистота получаемых продуктов и 4)простота их выделения,/

Недостатки, 1)дефицитность применяемого электролитического водорода и катализаторов, 2)большая пожаро- и взрывоопасность процесса и 3)необходимость использования во многих случаях автоклавов.

Легкость гидрирования отдельных групп, как правило, уменьшается в следующей последовательности: **двойные связи > нитро > карбонильные > нитрильные > ароматические и гетероциклические системы > гидроксильные > карбоксильные** группы



В зависимости от способа приготовления различают следующие виды катализаторов:

а) **черни** – очень мелкодисперсный металл, как правило, осажденный из раствора его соли восстановлением;

б) **катализаторы Адамса** – тонкоизмельченные платина или палладий, полученные восстановлением их оксидов водородом;

в) **скелетные катализаторы** (катализаторы Ренея) – получают в виде пористой ("губчатой") массы из двойных сплавов (никеля, железа, меди или кобальта соответственно с алюминием или кремнием) путем растворения одного компонента сплава в кислоте или щелочи;

г) **катализаторы на носителях** – металл в виде черни, окислов или солей, осажденный на пористый носитель (пемза, силикагель, уголь, карбонаты щелочноземельных металлов и т.д.) для увеличения поверхности и уменьшения расхода дорогостоящего благородного металла;

д) **окисные и сульфидные катализаторы** – хромиты меди, цинка, сульфиды молибдена, вольфрама и др. устойчивые и относительно дешевые промышленные катализаторы.

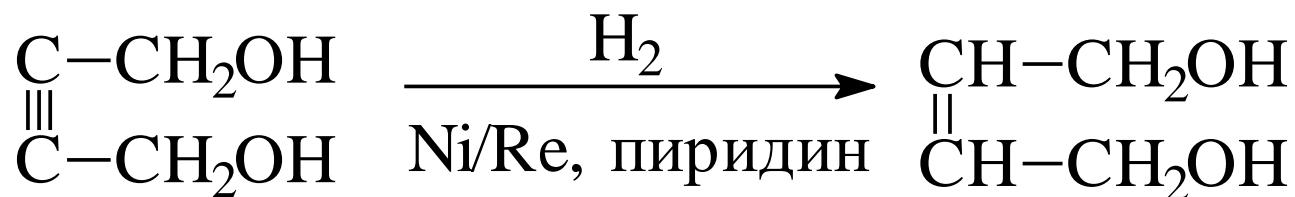
1. Восстановление на никелевых катализаторах

Скелетный катализатор никель Ренея готовят из сплава никеля и алюминия, растворением алюминия в водной щелочи в виде алюмината (20%-ная щелочь при 50°C). Никель Ренея **имеет** специфическую *пористую структуру* и **содержит** большое количество *сорбированного водорода* и *гидрида никеля*. Он **пирофорен** (способен к самовозгоранию на воздухе), поэтому его хранят под слоем воды. **Активность катализатора** зависит от способа получения (концентрации щелочи, температуры, продолжительности выщелачивания и способа промывки) и при хранении катализатора уменьшается.

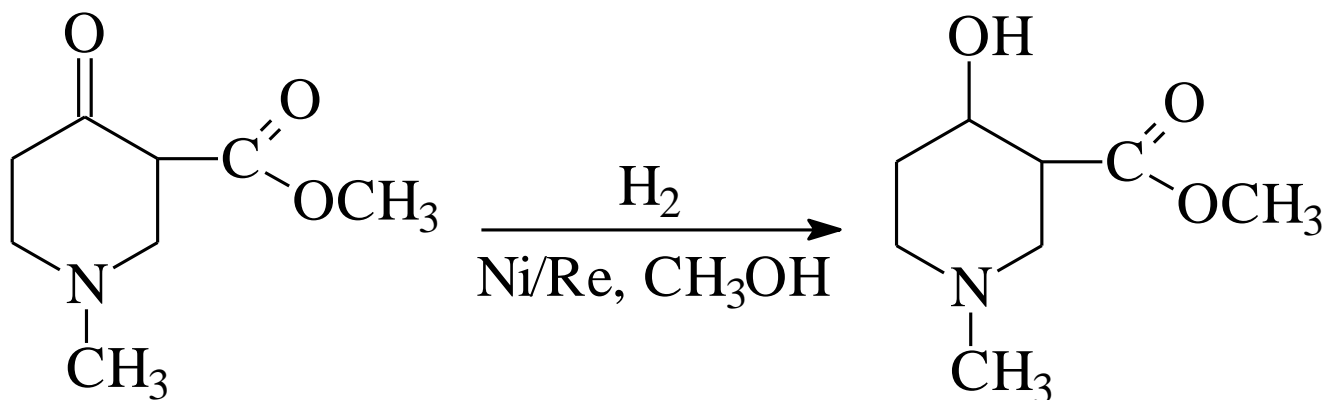
Восстановление водородом в присутствии **никеля Ренея** проводят под давлением в **автоклавах**, как правило, в спиртовой среде. Поскольку катализатор имеет большую плотность и быстро оседает на дно реактора, необходимо **хорошее перемешивание**. После окончания восстановления, о котором судят по количеству поглощенного водорода, катализатор отделяют фильтрованием, а спирт - отгоняют.

1. Восстановление изолированных кратных связей, не затрагивая ароматическую систему и другие функциональные группы ведут при 10 – 30 атм и температуре до 50°C:

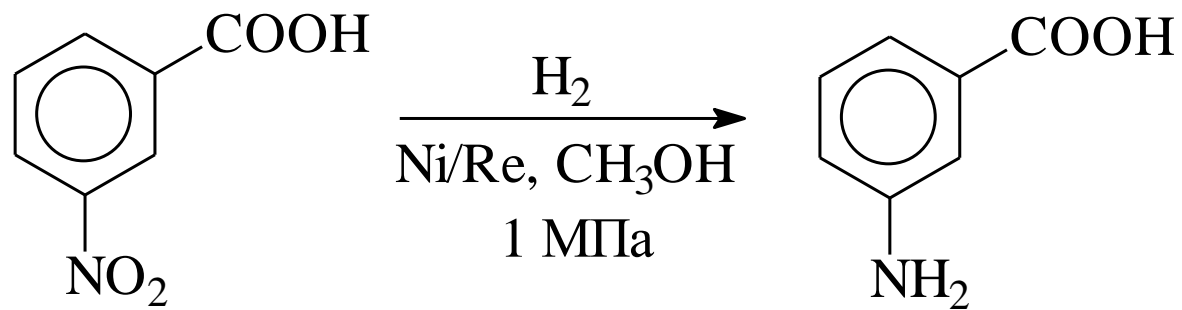
- Восстановление тройной связи до двойной (в пиридине):



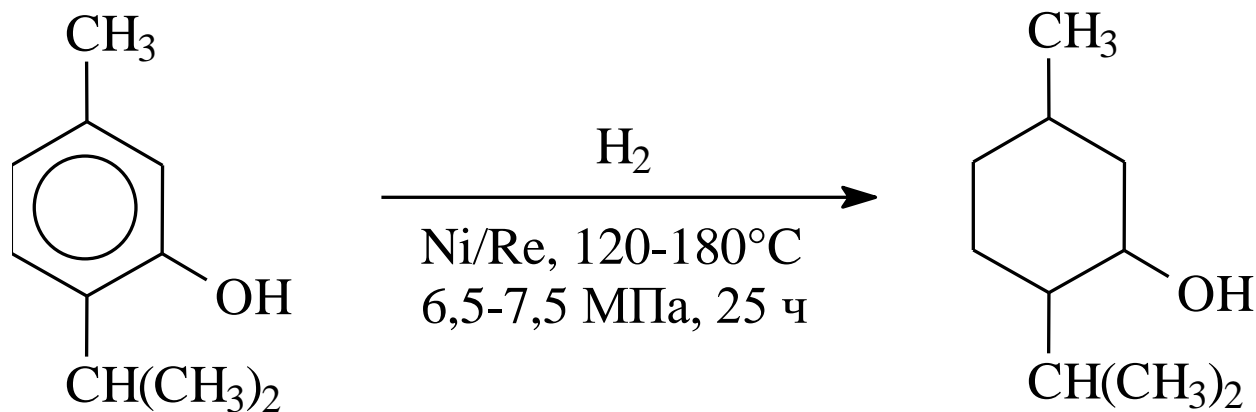
2. Восстановление карбонильной группы на никеле Ренея до гидроксильной:



3. Восстановление азотсодержащих групп на никеле Ренея до аминогруппы (около 10-20 атм, 100°C):



4. Восстановление ароматического кольца ведут при **150 ± 30°C** и давлении **выше 70 атм**, например, в синтезе ментола из тимола:



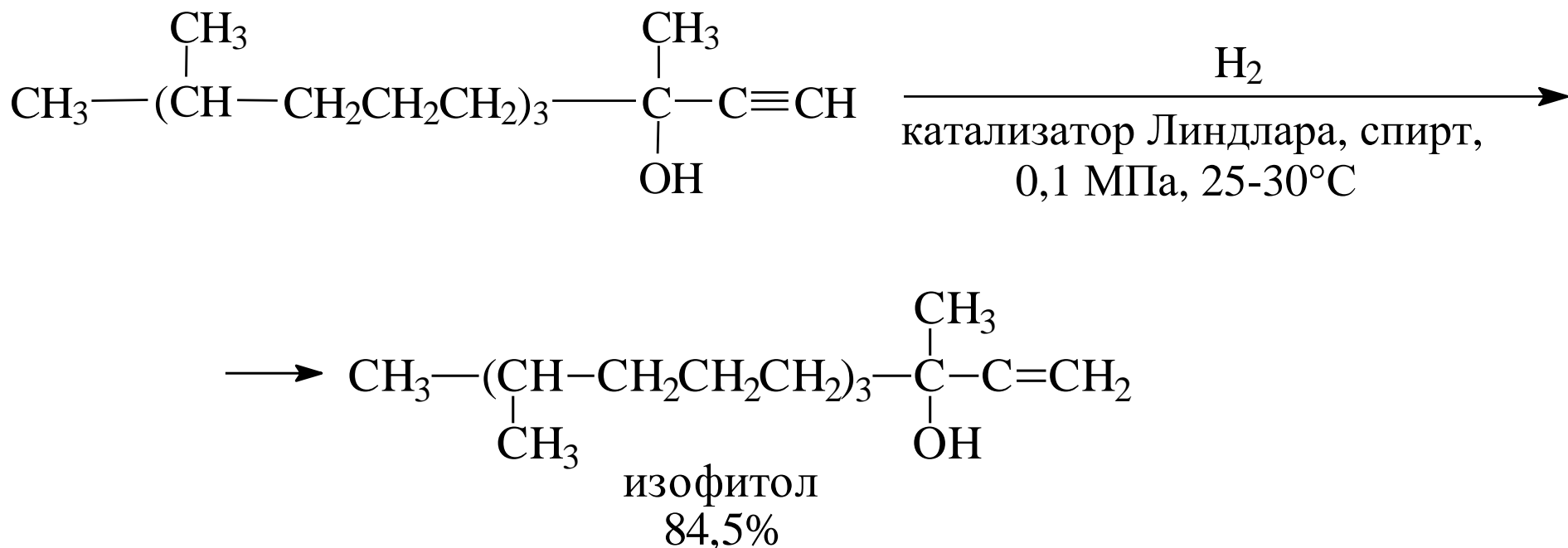
2. Восстановление на платиновых и палладиевых катализаторах

Значительно **активнее** никелевых водородом в их присутствии **восстанавливают почти все органические соединения**, способные к восстановлению, причем часто при атмосферном давлении. Однако платиновые и палладиевые катализаторы **дорогие** и, из-за большой активности, обычные катализаторы обладают **малой селективностью**. Для изменения активности катализаторов и увеличения их селективности используют различные **добавки**. Наиболее часто их применяют **в виде** платиновой или палладиевой **черни**, либо после осаждения металлов, их хлоридов и оксидов **на носители** – активированный уголь, пемзу, кремнезем, силикагель.

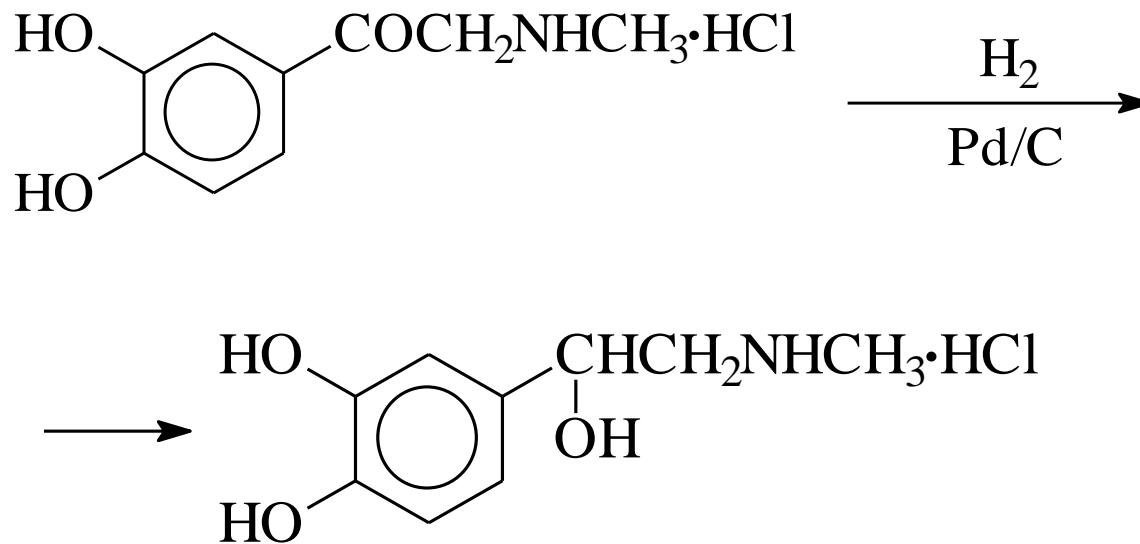
1. Нитрогруппа восстанавливается водородом в присутствии платиновой или палладиевой черни очень легко. В результате с почти количественным выходом образуются амины. Эта реакция была открыта М.М. Зайцевым в 1872 г. Восстановление можно проводить как в паровой (газовой) фазе, так и в жидкой фазе.

2. Восстановление двойных или тройных связей в алифатических или алициклических соединениях протекает значительно легче восстановления аренов. В противоположность водороду в момент выделения ***каталитически активированный водород*** легче взаимодействует с изолированными двойными связями, чем с сопряженными.

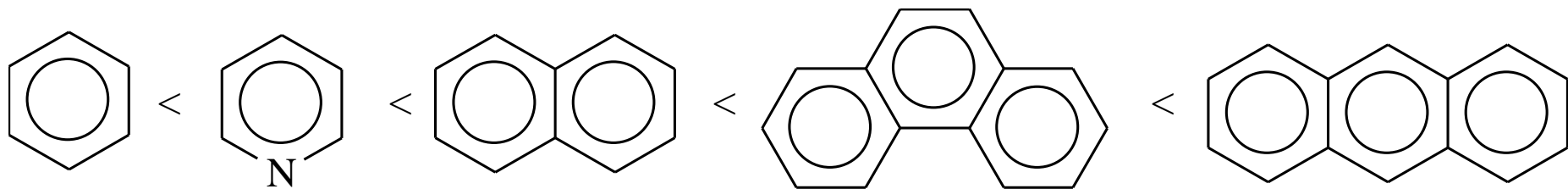
Для избирательного восстановления тройной связи до двойной применяют **катализатор Линдлара**, который представляет собой палладий, осажденный на карбонате кальция с добавлением ацетата свинца. Процесс этот используется во многих химико-фармацевтических производствах, в том числе и в производстве **В** и **А**:



3. Карбонильная и карбоксильная группы более устойчивы к восстановлению, чем алкены и алкины. Продуктами реакции являются соответствующие спирты. Для получения спиртов пригодны почти все упомянутые выше катализаторы.



5. Восстановление аренов идет наиболее трудно. **Легкость восстановления** ароматических углеводородов увеличивается с возрастанием числа конденсированных колец: **бензол < нафталин < фенантрен, антрацен**. Благодаря сходству ароматических и **гетероароматических соединений** последние гидрируются во многом аналогично. Однако **пиридин** в этом случае гидрируется легче бензола:



ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Многие виды сырья и продуктов могут быть источником пожара, взрыва или отравления.

В помещениях, где проводят восстановление **щелочными металлами** недопустимо использование воды в качестве тепло- и хладоносителя.

Цинковая пыль образует взрывоопасные смеси с воздухом. Поэтому загрузку цинковой пыли целесообразно производить в виде суспензии.

При восстановлении **сернистыми щелочами** герметизация аппаратуры, из которой может выделяться сероводород, должна быть настолько полной, чтобы в помещении не ощущался запах H_2S .

Отравление сероводородом наступает уже при концентрации его в воздухе $0,15 \text{ г/м}^3$.

Процессы восстановления **водородом и гидридами металлов**, особенно при использовании **пирофорных катализаторов** являются чрезвычайно взрыво- и пожароопасными. Поэтому особое внимание должно обращать на соблюдение технологии, герметизацию оборудования и эффективность вентиляции. Приготовление и регенерация **пирофорных катализаторов** должны проводиться в отдельном помещении. Необходимо следить, чтобы частички катализатора не забрасывались на стенки реактора, так как при подсыхании они способны к самовозгоранию. Может загореться также и отработанный катализатор. Поэтому его не отжимают на фильтре досуха и транспортируют в виде суспензии в воде или спирте. В тех случаях, когда это возможно, следует пользоваться непирофорными катализаторами.

Передавливание взрывоопасных
реакционных масс производят азотом или
другим инертным газом.
Многие субстраты и продукты реакции в
процессах восстановления являются
вредными или ядовитыми.