**Лекции 10. Сложные эфиры карбоновых кислот, их производные.**

Учебные вопросы:

1. Сложные эфиры предельных и непредельных одноосновных карбоновых кислот. Основные способы получения сложных эфиров, их использование, строение, номенклатура.
2. Физико-химические и пожароопасные свойства сложных эфиров; причины их повышенной пожарной опасности (по сравнению с изомерными карбоновыми кислотами).
3. Жиры и масла; гидрогенизация и окисление жиров. Пожарная опасность жиров и масел, их склонность к самовозгоранию.
4. Перекиси и гидроперекиси.

# Сложные эфиры карбоновых кислот. Жиры

Ранее уже было указано, что сложные эфиры являются производными спиртов и кислот. Их можно рассматривать либо как продукт замещения гидроксильного водорода в спирте на радикал кислоты (ацил) R-C=O, либо как продукт замещения гидроксила в карбоксильной группе кислоты на остаток спирта – OR’:

R-C-OH HO-R’ R-C-OR’

 II + ⎯→ II

 O к-та спирт O сложный эфир

# Номенклатура

Названия сложных эфиров обычно производят от наименований образующих их спирта и кислоты. Часто употребляют также названия, которые выводят из наименования углеводородного радикала спирта и корня латинского наименования кислоты (или, что тоже, корня названия радикала этой кислоты) с добавлением к последнему окончания – ат.

Например: Н—С—О—СН3 СН3—С—О—С2Н5 О=С—О—С2Н5

 II II I

 O O O=C—OH метиловый эфир му- этиловый эфир укс. неполный этиловый

равьиной к-ты; муравь- к-ты; уксусноэти- эфир щавелевой к-ты;

инометиловый эфир; ловый эфир; этил- моноэтилоксалат.

метилформиат. ацетат.

# Физические свойства

Сложные эфиры могут быть как жидкими, так и твердыми веществами в зависимости от молекулярного веса образующих их кислоты и спирта. Сложные эфиры низших и средних гомологов – летучие жидкости с характерным, часто приятным запахом. Многие из них являются носителями запаха различных плодов, овощей и фруктов. Сложные эфиры труднее растворимы в воде, чем образующие их спирты и кислоты. Так, этиловый спирт и уксусная кислота смешиваются с водой во всех отношениях, тогда как уксусноэтиловый эфир трудно растворим в воде. В органических растворителях сложные эфиры растворяются хорошо.

# Химические свойства

## Гидролиз (омыление) сложных эфиров

Под действием воды, особенно в кислой или щелочной среде, сложные эфиры разлагаются (гидролизуются) с образованием кислоты и спирта:

 O O

 II II

CH3—C—O—C2H5 + HOH → CH3—C—OH + C2H5OH

 уксусноэтиловый эфир уксусная к-та этиловый спирт

Этим сложные эфиры отличаются от *простых эфиров*, которые, как уже известно, *гидролизу не подвергаются*. Однако гидролиз сложных эфиров идет медленно и гораздо менее энергично, чем гидролиз ангидридов.

Минеральные кислоты значительно увеличивают скорость гидролиза сложных эфиров: образуемые ими ионы водорода являются в этой реакции катализаторами. Еще быстрее сложные эфиры гидролизуютя под влиянием щелочей благодаря каталитическому действию гидроксильных ионов; кроме того, щелочи нейтрализуют образующуюся из эфира кислоту и тем самым способствуют течению реакции. Продуктами щелочного гидролиза сложных эфиров является спирт и соль кислоты:

 O O

 II II

 R—C—O—R’ + NaOH ⎯→ R—C—ONa + R’—OH

 сложный эфир соль к-ты спирт

**Щелочной гидролиз сложных эфиров называют омылением**. Скорость гидролиза эфиров возрастает также при нагревании и в случае применения избытка воды.

# Способы получения сложных эфиров

## Реакция этерификации

Сложные эфиры могут быть получены при непосредственном взаимодействии кислоты и спирта, например:

CH3—C—OH + HO—CH2—CH3 CH3—C—O—CH2—CH3 + H2O

 II укс. к-та II этиловый эфир

 О О уксусной кислоты

Как уже было указано, такую реакцию называют реакцией **этерификации**. Для органических кислот она протекает очень медленно, причем, скорость образования эфира зависит от строения исходных кислот и спирта. Скорость этерификации увеличивается при нагревании и, особенно, в присутствии минеральных кислот благодаря каталитическому действию ионов водорода. Особенно в качестве катализатора применяют серную кислоту (В.В. Марковников, 1873г.)

Реакция этерификации обратима. Это объясняется тем, что получаемый сложный эфир гидролизуется одновременно образующейся при реакции водой, и поэтому процесс идет в обратном направлении с разложением эфира на кислоту и спирт. При этом, чем больше накапливается воды, тем больше скорость обратной реакции, последняя ускоряется и при нагревании, а также под влиянием ионов водорода, вводимых для ускорения прямой реакции. Таким образом, реакция этерификации не доходит до конца, а лишь достигает состояния химического равновесия, применение же катализаторов и повышение температуры только ускоряет достижения равновесия. Соотношение всех реагирующих веществ в момент равновесия зависит от строения кислоты и спирта, а также от склонности сложного эфира к гидролизу.

Чтобы увеличить количество образующегося эфира, т.е. сместить равновесие реакции этерификации вправо одно из реагирующих веществ (то, которое доступнее) берут в избытке (в соответствии с законом действия масс). При избытке спирта в реакцию может вступить практически вся кислота, при избытке кислоты – весь спирт.

Другой способ увеличения выхода сложного эфира заключается в постоянном выведении из реакции одного из образующихся веществ – эфира или воды. Так, применяемая при этерификации в качестве катализатора серная кислота, кроме того, является веществом, связывающим воду, и таким образом способствует смещению равновесия вправо.

## Получение из солей кислот

Сложные эфиры могут быть получены из солей кислот при действии на них галогенпроизводных. Например: (из ацетата серебра и хлористого этила)

 O O

 II II

СН3—С—ОAg + Cl—CH2—CH3 ⎯→ CH3—C—O—CH2—CH3 + AgCl↓

 этилацетат

Преимущество этого метода заключается в том, что реакция необратима и, таким образом, достигается хороший выход эфира. Однако применяемые исходные вещества дороже, чем свободные кислота и спирт, используемые в методе этерификации.

## Получение из галогенангидридов кислот

Аналогичный предыдущему метод получения сложных эфиров заключается в действии спиртов или алкоголятов на галогенангидриды кислот. Например: O O

СH3—CH2—ONa + Cl—C—CH3 ⎯→ CH3—CH2—O—C—CH3 + NaCl

этилат натрия хлорангидрид этилацетат

 укс. кислоты;

 хлористый ацетил.

## Получение из ангидридов кислот

При действии спиртов на ангидриды кислот также достигаются хорошие выходы сложных эфиров:

 O O O

СH3—C II II

 O + HO—CH3 → CH3—C—O—CH3 + CH3—C—OH

CH3—C метиловый метилацетат уксусная к-та

 O спирт

укс. ангидрид - (ацетангидрид)

# Отдельные представители сложных эфиров

Уксусноэтиловый эфир (этилацетат) CH3COOC2H5.

Представляет собой бесцветную жидкость с характерным запахом. (Ткип. 77,2 оС, d420 =0,901). Довольно трудно растворим в воде. В технике широко используется как растворитель, особенно ВМС –пластмасс, входит в состав лаков и т.п. Применяется как исходное вещество в некоторых синтезах.

Уксусноизоамиловый эфир (изоамилацетат).

Его формула CH3COOCH2CH2CH(CH3)2.Бесцветная жидкость с запахом груш (Ткип. 142 оС, d415=0,8762) почти не растворим в воде. Применяется в качестве растворителя подобно этилацетату, а также как пахучее вещество в пищевой промышленности и в парфюмерии.

# Сложные эфиры фруктовых эссенций

Приятным запахом фруктов, цветов и т.п. обладают и другие, получаемые путем синтеза, сложные эфиры. Например:

Эфир формула запах

Муравьиноэтиловый Н-СО-О-С2Н5 рома

(этилформиат)

муравьиноамиловый Н-СО-О-С5Н11 вишен

(амилформиат)

муравьиноизоамиловый Н-СО-О-С5Н11 слив

(изоамилформиат)

масляноэтиловый С3Н7-СО-О-С2Н5 абрикосов

(этилбутират)

масляноизоамиловый С3Н7-СО-О-С5Н11 ананасов

(изоамилбутират)

изовалериановоизоамиловый С4Н9-СО-О-С5Н11 яблок

(изоамилизовалерат)

Многие из таких эфиров входят в состав искусственных *фруктовых эссенций*. Последние представляют собой часто очень сложные смеси различных как синтетических, так и натуральных веществ. Их применяют в кондитерском производстве, при изготовлении безалкогольных напитков, в парфюмерии. По одной из рецептур в состав абрикосовой эссенции входит 88, а яблочной – 20 различных компонентов. Рецептуры фруктовых эссенций для пищевых продуктов строго регламентируются государственными органами санитарного надзора. Пищевые эссенции должны быть совершенно безвредными.

# Эфиры акриловой и метакриловой кислот

В промышленности пластических масс большое значение имеют эфиры непредельных кислот – акриловой и метакриловой. Обычно получают эфиры этих кислот с метиловым спиртом – метилакрилат и метилметакрилат:

 О СН3 О

 II I II

CH2=CH—C—O—CH3 CH2=C—C—O—CH3

метилакрилат (Ткип. 80 оС) метилметакрилат (Т кип. 100,3 оС)

И тот, и другой - эфиры, легко полимеризуются с разрывом двойной связи и образуются соответственно полиметилакрилат и полиметилметакрилат, которые обычно называют полиакрилатами:

 n CH2=CH → ... —CH2—CH—CH2—CH— ...

 I I I

 COOCH3 COOCH3 COOCH3

 метилакрилат полиметилакрилат

 СН3 СН3 СН3

 I I I

 n CH2=C → ... —CH2—C—CH2—C— ...

 I I I

 COOCH3 COOCH3  COOCH3

 метилметакрилат полиметилметакрилат

Образующиеся полимеры бесцветны и прозрачны. Полиметилакрилат используют для производства пленок и листов, в качестве клея (для изготовления без осколочного стекла триплекс), а также в производстве искусственной кожи. Из полиметилметакрилата готовят исключительно ценный синтетический материал – органическое стекло (плексиглас). Последнее превосходит силикатное стекло по прозрачности и по способность пропускать УФ-лучи. Его используют в машино- и приборостроении, при изготовлении различных бытовых и санитарных предметов, посуды, украшений, часовых стекол. Благодаря физиологической индифферентности полиметилметакрилат нашел применение для изготовления зубных протезов и т.п.

# Сложные виниловые эфиры

При присоединении кислот к ацетилену образуются эфиры несуществующего в свободном состоянии винилового спирта CH2=CH-OH – сложные виниловые эфиры.

Важнейший в этом ряду винилацетат – эфир винилового спирта и уксусной кислоты. Его получают, например, при пропускании смеси паров уксусной кислоты и ацетилена над ацетатами кадмия и цинка при 180-220 оС:

СН3-СООН + СН≡СН ⎯→ СН3-СО-О-СН=СН2

Винилацетат – бесцветная жидкость с Ткип.=73 оС, d420=0,9342. Легко полимеризуется, образуя синтетический высокополимер – поливинилацетат:

 n CH2=CH ⎯→ .... —CH2—CH—CH2—CH— ...

 I O I O I O

 O-C-CH3 O-C-CH3 O-C-CH3

 винилацетат поливинилацетат

Вследствие низкой термостойкости поливинилацетат как таковой применяется в сравнительно небольших количествах – для изготовления лаков, клеев, искусственной кожи. Большое значение имеют сополимеры винилацетата с хлористым винилом и эфирами акриловой кислоты. Много поливинилацетата подвергают щелочному или кислотному гидролизу для получения поливинилового спирта:

... —CH2—CH—CH2—CH—CH2—CH— ... ⎯⎯⎯⎯⎯→

 I I I n H2 O (OH- илиН+ )

 ОСОСН3 ОСОСН3 ОСОСН3

⎯→ ... —CH2—CH—CH2—CH—CH2—CH— ... + nCH3COOH

 I I I поливиниловый сп. OH OH OH укс. к-та

Этот процесс может служить примером *полимераналогичных превращений.*

# Воски

Воски как растительные, так и животные представляют собой в основном сложные эфиры высших карбононовых кислот и высших одноатомных спиртов. Так, например, в состав пчелиного воска входит эфир пальмитиновой кислоты и мирицилового спирта С15Н31-СО-ОС30Н61 (Тпл. 72 оС).

# Глицериды

Глицеридами называются сложные эфиры карбоновых кислот и трехатомного спирта глицерина. Они входят в состав чрезвычайно важных веществ – жиров, поэтому на рассмотрении глицеридов мы остановимся несколько подробнее.

# Жиры

Природные жиры животного и растительного происхождения – это смеси сложных эфиров, образованных высшими карбоновыми кислотами и трехатомным спиртом глицерином, т.е. смеси глицеридов высших кислот. Значение жиров исключительно велико. Прежде всего они - важнейшая составная часть пищи человека и животных наряду с углеводами и белковыми веществами. Суточная потребность взрослого человека в жирах 80-100г.

Большое значение имеет техническая переработка жиров: из них получают такие ценные материалы, как мыло, стеарин, олифы для масляных красок и т.п.

В большинстве случаев в состав жиров входят полные эфиры глицерина, образовавшиеся в результате этерификации всех трех его гидроксильных групп и называемые триглицеридами, поэтому строение жиров может быть выражено следующей общей формулой:

 α СН2—O—C—R

 I O

 β CH —O—C—R'

 I O

 α' CH2—O—C—R"

 O

В настоящее время из жиров выделено несколько десятков разнообразных предельных и непредельных кислот; почти все они содержат неразветвленные цепи углеродных атомов, число которых, как правило, четное и колеблется от 4 до 26. Однако именно высшие кислоты, преимущественно с 16 и 18 углеродными атомами – главная составная часть всех жиров. Из предельных высших жирных кислот наиболее важны пальмитиновая С15Н31СООН и стеариновая С17Н35СООН. Из непредельных высших кислот в жирах чаще всего встречается олеиновая С17Н33СООН (с одной двойной связью). Очень важны также незаменимые полиненасыщенные кислоты – линолевая С17Н31СООН (с двумя двойными связями) и линоленовая С17Н29СООН (с тремя двойными связями).

Кислоты входят в состав жиров главным образом в виде смешанных триглицеридов, т.е. таких, которые содержат остатки двух или трех разных кислот. Остатки могут занимать различные положение при углеродных атомах молекулы глицерина (последние обозначают α, β, α', как показано выше в общей формуле триглицерида). Это существенно сказывается на свойствах смешанных триглицеридов. Простые триглицериды, содержащие три остатка какой-нибудь одной кислоты, в природных жирах встречаются сравнительно редко (когда в жире по содержанию резко преобладает какая-либо одна кислота).

В качестве примеров смешанных триглецеридов приведем пальмитоолеостеарин, содержащий остатки пальмитиновой, олеиновой и стеариновой кислот, и диолеостеарин с двумя остатками олеиновой и одним остатком стеариновой кислот:

 α СН2—O—C—С15Н31  СН2—O—C—С17Н33

 I O I O

 β CH —O—C—С17Н33 СН2—O—C—С17Н35

 I O I O

 α' CH2—O—C—С17Н35  СН2—O—C—С17Н33

 O O

 α-пальмито-β-олео- α, α' –диолео-β-стеарин

 α'-стеарин

Примерами простых триглицеридов могут служить трипальмитин, тристеарин и триолеин:

 СН2—O—C—С15Н31 СН2—O—C—С17Н35 СН2—O—C—С17Н33

 I O I O I O

 CH —O—C—С15Н31 СН2—O—C—С17Н35  СН2—O—C—С17Н33

 I O I O I O

 CH2—O—C—С15Н31 СН2—O—C—С17Н35 СН2—O—C—С17Н33

 O O O

трипальмитин (твердый) тристеарин (тверд.) триолеин (жидкий)

 Тпл. 65 оС Тпл. 72 оС Тпл. –4 оС

Жиры практически не растворимы в воде, но хорошо растворимы в спирте, эфире и в других органических растворителях. Температуры плавления жиров зависит от того, какие кислоты участвуют в образовании входящих в их состав глицеридов. Жиры, содержащие преимущественно остатки предельных кислот, имеют наиболее высокие Тпл. и представляют собой твердые или мазеобразные вещества, жиры же, в составе которых содержатся остатки главным образом непредельных кислот – жидкости с более низкими температурами плавления. Так, трипальмитин и тристеарин – твердые вещества, а триолеин – жидкость с Тпл. –40С.

*По происхождению жиры подразделяют на животные и растительные.*

Животные жиры добываются из жировых тканей различных животных, из молока. Они содержат в своем составе преимущественно стеариновую и пальмитиновую кислоты и сравнительно небольшое количество олеиновой кислоты. Поэтому в большинстве своем они являются твердыми или мазеобразными веществами (говяжье, баранье или свиное сало). Однако встречаются и животные жиры, содержащие значительное количество непредельных кислот и представляющие собой жидкие вещества (ворвань, тресковый жир).

Растительные жиры обычно называют маслами. Их добывают из семян и мякоти плодов различных растений. Они отличаются высоким содержанием олеиновой и других непредельных кислот и содержат лишь незначительное количество стеариновой и пальмитиновой кислот (подсолнечное, оливковое, хлопковое, льняное и др. масла). Лишь в некоторых растительных жирах преобладают предельные кислоты, и они являются твердыми веществами (кокосовое масло, масло какао и др.). Как уже было указано, наличие в растительных маслах непредельных и особенно незаменимых полиненасыщенных кислот придает им особую пищевую ценность.

# Гидрогенизация жиров

Жидкие жиры и масла путем каталитического присоединения водорода по месту двойных связей входящих в их состав непредельных кислот могут быть превращены в твердые жиры. Это метод называют гидрогенизацией (отверждением) жиров. Впервые он был разработан в 1906г. русским ученым С.А. Фокиным, а в 1909г. им же осуществлен в промышленном масштабе.

Гидрогенизацию ведут в присутствии мелкораздробленного металлического никеля (катализатор) при 160-240 оС, пропуская в нагретое масло под давлением до 3 атм. очищенный газообразный водород. При этом непредельные триглицериды превращаются в предельные. Например:

 9 10

 СН2—О—С—(СН2)7—СН=СН—(СН2)7—СН3

 I О 9 10 + 3 Н

 СН—О—С—(СН2)7—СН=СН—(СН2)7—СН3 ⎯⎯→

 I О 9 10 Ni

 СН2—О—С—(СН2)7—СН=СН—(СН2)7—СН3

 О триолеин (жидкий)

 9 10

 СН2—О—С—(СН2)7—СН2—СН2—(СН2)7—СН3

 I О 9 10

 → СН—О—С—(СН2)7—СН2—СН2—(СН2)7—СН3

 I О 9 10

 СН2—О—С—(СН2)7—СН2—СН2—(СН2)7—СН3

 О тристеарин (твердый)

Твердый жир, получаемый путем гидрогенизации жидких растительных масел или жиров морских животных и рыб, называется саломасом. Его широко применяют для производства искусственного твердого пищевого жира – маргарина, а также в мыловарении и др. Различные сорта маргарина получают, смешивая саломас с молоком, в некоторых случаях – с яичным желтком. Получается продукт, по внешнему виду напоминающий сливочное масло, приятный запах последнего достигается введением в маргарин специальных ароматизаторов – сложных композиций различных веществ, непременной составной частью которых является диацетил (СН3—С—С—СН3 - жидкость желтого цвета, содержится в коровьем масле.) II II

 О О

 Гидрогенизация жиров имеет очень большое практическое значение. Потребность в твердых жирах в народном хозяйстве огромна. Из них получают наиболее ценные сорта мыл. Они удобнее для употребления в пищу. Кроме того, твердые жиры, поскольку они не содержат двойных связей (или содержат их значительно меньше, чем жидкие жиры), труднее окисляются и поэтому менее подвержены порче (прогорканию) при хранении. Применение гидрогенизации жидких жиров и масел дает возможность восполнить недостаток твердых жиров.

# Реакции, характеризующие не насыщенность жиров

Раствор KMnO4 при встряхивании с маслами теряет фиолетовую окраску, при этом окисляются по месту двойных связей входящие в состав масел непредельные кислоты (подобно окислению этиленовых углеводородов) и восстанавливается Mn7+. Твердые жиры, содержащие мало непредельных глицеридов, обесцвечивают раствор KМnO4 в значительно меньшей мере.

Окрашенные в бурый цвет растворы иода и брома обесцвечиваются при взаимодействии с входящими в состав жиров непредельными кислотами в результате присоединения галогенов по двойным связям. Например:

 9 10 I 2 9 10

-СО-(СН2)7-СН=СН-(СН2)7-СН3 ⎯→ -СО-(СН2)7-СН-СН-(СН2)7-СН3

 остаток олеиновой к-ты I I остаток 9,10-иод-

 I I стеариновой к-ты

Эта реакция не только качественно, но и количественно характеризует не насыщенность (непредельность) жиров. Так, представление о содержании непредельных кислот в масле дает иодное число – количество граммов иода, которое может присоединяться (при соблюдении стандартных условий) к непредельным кислотам в 100г. жиров. Для большинства жиров и растительных масел иодное число 30-150, для сливочного масла - 30, для говяжьего сала - 32-50, для богатого непредельной олеиновой кислотой оливкового («прованского») масла 75-88. Высокие иодные числа у богатых полиненасыщенных кислотами высыхающих масел (льняное 170-180, конопляное 140-165).

Все жиры являются горючими веществами. При горении их выделяется большое количество тепла: 1г жира при горении дает 9300кал.

# Перекиси и гидроперекиси

Органическими перекисями называют производные перекиси водорода Н-О-О-Н, строение которых можно представить формулой R-O-O-R. Производные перекиси водорода образованные в результате замещения на углеводородный радикал только одного атома водорода, называются *гидроперекисями*, они имеют строение R-O-O-H. В диэтиловом эфире (CH3-CH2-O-CH2-CH3) образуется смесь перекисных соединений, среди них, например, перекись оксиэтила

СН3—СН—О—О—СН—СН3

 I I

 ОН ОН

Для разложения перекисей долго стоявших эфир перед перегонкой рекомендуется обработать раствором щелочи или какого-нибудь восстановителя (Na2SO3 – сульфит натрия).

Чтобы предотвратить образование перекисей, эфир надо хранить в хорошо закупоренных сосудах из темного стекла.

Перекисные соединения при нагревании могут разлагаться со взрывом.

# Пероксикарбоновые кислоты и ацилпероксиды

Получают ацилированием пероксида водорода, либо окислением альдегидов: O O

 R—C—X + HOOH ⎯→ R—C—O—OH + HX

 пероксикарбоновая к-та

 O O O O

R—C—X + HO—O—C—R ⎯→ R—C—O—O—C—R + НХ

 ацил пероксида

 O O (сухой) O

 R—C—H ⎯⎯⎯→ R—C—O—OH

 -10....-30 оC

 O

Пероксиуксусная кислота CH3—C—O—OH. Бесцветная жидкость, Ткип. 25 оС, хорошо растворима в воде и органических растворителях. При 100-110 оС разлагается со взрывом. Получается окислением ацетальдегида кислородом. Используется в качестве сильного окислителя.

 О

Пероксибензойная кислота С6Н5—С—О—ОН (пербензойная кислота, реагент Н.Прилежаева). бесцветное кристаллическое вещество, Тпл.=41 оС, слабо растворимое в воде. Получают из бензоилпероксида:

 O O

С6Н5-СО-О-О-СО-С6Н5 + Na-O-CH3 ⎯→ C6H5-C-O-O-Na + C6H5-C-O-CH3

 Перекись бензоила (C6H5-CO)2O2. Это соединение представляет собой продукт замещения водородных атомов в перекиси водорода (H2O2) двумя остатками бензойной кислоты – бензоильными радикалами. Получают перекись бензола действием хлорангидрида бензойной кислоты на Н2О2 в присутствии щелочи или на перекись натрия (Na2O2):

 O 2NaOH O

 С6Н5—С—Cl + HO ⎯⎯→ С6Н5—С—O + 2NaCl + 2H2O

 С6Н5—С—Cl I С6Н5—С—O

 O HO O

 хлористый бензоил

Перекись бензоила – бесцветные кристаллы с Тпл.=106-108 оС. Имеет большое практическое значение как инициатор полимеризации соединений с двойной связью типа СН2=СНХ.

Гидроперекись изопропилбензола. В последние годы разработан и применяется в промышленности способ синтеза фенола исходя из изопропилбензола (кумола). Последний в свою очередь получают по реакции Фриделя-Крафтса взаимодействием бензола с пропиленом.

Изопропилбензол в присутствии катализаторов окисляют кислородом воздуха – образуется гидроперекись изопропилбензола.

 CH3 CH3 CH3

 I I H2 SO4 I

C6H5—CH + O2 ⎯→ C6H5—C—O—OH ⎯⎯→ C6H5—OH + C=O

 I I I

 CH3 CH3  CH3

Реакция протекает с очень хорошим выходом фенола и ацетона.