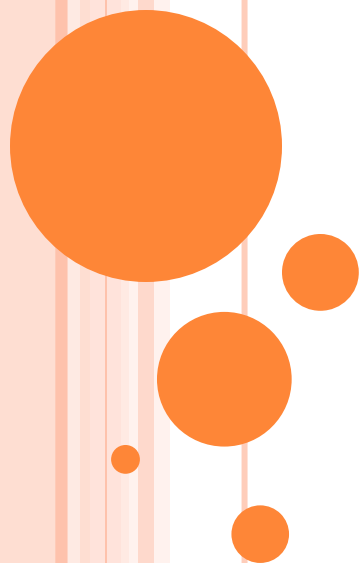


Дисциплина «БИОЛОГИЧЕСКАЯ ХИМИЯ»

ТЕМА ЛЕКЦИИ: БИОЭНЕРГЕТИКА

К.б.н. , доцент Бахта А.А.



ПЛАН ЛЕКЦИИ

- 1. Общие понятия биоэнергетики
- 2. Цепь биологического окисления
- 3. Окислительное фосфорилирование



БИОЭНЕРГЕТИКА

- ▣ **Биоэнергетика** - это раздел биохимии, изучающий преобразование и использование энергии в живых клетках.
- ▣ **Биоэнергетика** — это часть более общей науки — термодинамики.
- ▣ С точки зрения термодинамики, **клетка организма** представляет собой **открытую термодинамическую систему**, обменивающуюся с окружающей средой массой (веществом) и энергией



- Количественной мерой движения материи является энергия.
- **Внутренняя энергия** биохимической системы включает любой вид энергии, которая может быть изменена при химической реакции.
- **Внутренняя энергия** биологической системы представлена **суммой**:
 1. *кинетическая энергия* (энергия движения, колебания, вращения всех частиц)
 2. *потенциальная энергия* — энергия, сохраняемая в химических связях между атомами, энергия нековалентных взаимодействий между молекулами и ионами



ФОРМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

- 1. **Теплота** — форма передачи энергии в виде неупорядоченного движения материи по градиенту температуры
- 2. **Работа**— форма передачи энергии в виде упорядоченного движения, связанное с перемещением тел в пространстве и преодолении сил трения-



- Всем живым организмам необходима энергия из внешней среды, т.е. любая *живая клетка обеспечивает свои энергетические потребности за счет внешних ресурсов*. К таким энергетическим ресурсам можно отнести ***питательные вещества***, расщепляющиеся в клетке до менее энергетически ценных конечных продуктов



ОСВОБОЖДЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КАТАБОЛИЗМЕ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ.

- При рассмотрении катаболизма различных субстратов условно можно выделить три этапа освобождения энергии:

1. Подготовительный

2. **частичным распадом мономеров до таких соединений, как ацетил-КоА и метаболиты цикла Кребса - щавелевоуксусная, α - кетоглутаровая, фумаровая кислоты.**

3. **Третий этап - это окончательный распад метаболитов до оксида углерода (IV) и воды с выделением энергии. Он протекает в аэробных условиях и представляет собой биологическое окисление**



ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП

- На этом этапе происходит расщепление биополимеров, поступающих с пищей или находящихся внутри клетки, до мономеров. Энергетической значимости этот этап практически не имеет, так как происходит освобождение лишь 1% или менее энергии субстратов. Извлеченная на этом этапе энергия рассеивается в виде тепла



ЭТАП 2

- Второй этап характеризуется частичным распадом мономеров до таких соединений, как ацетил-КоА и метаболиты цикла Кребса - щавелевоуксусная, α -кетоглутаровая, фумаровая кислоты.
- На втором этапе число субстратов сокращается до нескольких.
- На этом этапе происходит освобождение до 20% энергии, заключенной в исходных субстратах, происходящее в анаэробных условиях.
- Часть этой энергии аккумулируется в фосфатных связях АТФ, а остальная рассеивается в виде тепла.
- АТФ в анаэробных условиях образуется из АДФ и фосфата, снятого с субстрата. Процесс образования АТФ из АДФ и фосфата, снятого с субстрата, называется **субстратным фосфорилированием**. Однако посредством реакций субстратного фосфорилирования образуется сравнительно небольшое количество АТФ.



Этап 3

- Третий этап - это окончательный распад метаболитов до оксида углерода (IV) и воды.
- Он протекает в аэробных условиях и представляет собой биологическое окисление.
- Метаболиты, оставшиеся после второго этапа освобождения энергии, поступают в **цикл Кребса**, результатом которого являются восстановленные формы коферментов **НАД и ФАД**
- Снятый с метаболитов цикла Кребса водород является универсальным энергетическим топливом процесса **цепи биологического окисления** представленного цепью ферментов, локализованных во внутренней мембране митохондрий. Этот ансамбль ферментов представляет собой цепь оксидоредуктаз, где сопряженно с переносом протонов и электронов на молекулярный кислород происходит активирование неорганического фосфата и далее - фосфорилирование АДФ с образованием АТФ. Окисление, сопряженное с синтезом АТФ, называется **окислительным фосфорилированием**.



ЦЕПЬ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ

- - это совокупность окислительных процессов в живом организме, протекающих с обязательным участием кислорода, сопряженное с процессом окислительного фосфорилирования.
- Синоним - ТКАНЕВОЕ ДЫХАНИЕ



ЦБО

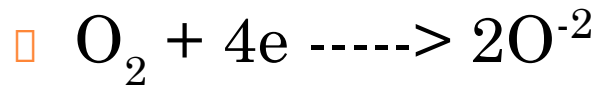
- Система митохондриального окисления - мультиферментная система, постепенно транспортирующая протоны и электроны на кислород с образованием молекулы воды.
- Все ферменты митохондриального окисления встроены во внутреннюю мембрану митохондрий.
- Только первый переносчик протонов и электронов - никотинамидная дегидрогеназа расположена в матриксе митохондрии.
- Этот фермент отнимает водород от субстрата и передает его следующему переносчику.
- Полный комплекс таких ферментов образует **"дыхательный ансамбль"** («дыхательную цепь»), в пределах которого атомы водорода отнимаются от субстрата, затем передаются последовательно от одного переносчика к другому, и, наконец, передаются на кислород воздуха с образованием воды.



- Существует строгая последовательность работы каждого звена в цепочке переносчиков.
- Эта последовательность определяется величиной **РЕДОКС-ПОТЕНЦИАЛА (ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА, сокращенно - ОВП)** каждого звена.
- ОВП - это химическая характеристика способности вещества принимать и удерживать электроны.
- Выражается в вольтах (V).
- Вещества с положительным ОВП окисляют водород (отнимают от него электроны), вещества с отрицательным ОВП окисляются самим водородом.
- Самый низкий ОВП имеет начальное звено цепи, самый высокий - у кислорода, расположенного в конце цепочки переносчиков.
- Таким образом, передача водорода идет от более низкого к более высокому ОВП.
- Перенос водорода и электронов возможен только в одном направлении - в порядке возрастания их ОВП: от $-0.32V$ у никотинамидных дегидрогеназ (первого компонента главной цепи МтО) до $0.82V$ у O_2 , обладающего самым высоким редокс-потенциалом.



- На одной из стадий происходит разделение атомов водорода на H^+ и электроны. Протоны остаются временно в окружающей среде, а электроны идут дальше по цепи и в ее конце используются для активации O_2 . Кислород является конечным акцептором электронов.



(полное восстановление кислорода)

- Все реакции, происходящие в дыхательной цепи, сопряжены. Переносчики водорода и электронов расположены в строгом порядке, в соответствии с величиной их редокс-потенциала.



- В цепи биологического окисления высокоэнергетические электроны и протоны водорода перемещаются по многоступенчатой цепи переносчиков, как по лестнице, идущей вниз. При переходе с высшей ступени на низшую электрон теряет энергию, которая используется для образования высокоэнергетической связи в АТФ.



- При прохождении электронов и протонов водорода по «ступенькам» этой цепи до кислорода за счет их энергии три молекулы АДФ фосфорилируются до трех молекул АТФ.



В результате присоединения к кислороду четырех электронов (e^-), пришедших из цепи переноса, и четырех протонов (H^+) из водной среды молекула кислорода восстанавливается до двух молекул воды:



- В настоящее время различают три варианта дыхательных цепей:
- 1) ГЛАВНАЯ (ПОЛНАЯ) ЦЕПЬ
- 2) УКОРОЧЕННАЯ (СОКРАЩЕННАЯ) ЦЕПЬ
- 3) МАКСИМАЛЬНО УКОРОЧЕННАЯ (МАКСИМАЛЬНО СОКРАЩЕННАЯ) ЦЕПЬ.



□ ГЛАВНАЯ (ПОЛНАЯ) ЦЕПЬ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ



ФЕРМЕНТЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ

- КЛАСС – оксидоредуктазы
- 1. дегидрогеназы:
 - 1.1. никотинзависимые дегидрогеназы (кофактор - НАД)
 - 1.2. флавинзависимые дегидрогеназы (ФМН, ФАД)
- 2. оксидазы - цитохромы (кофактор - железо)



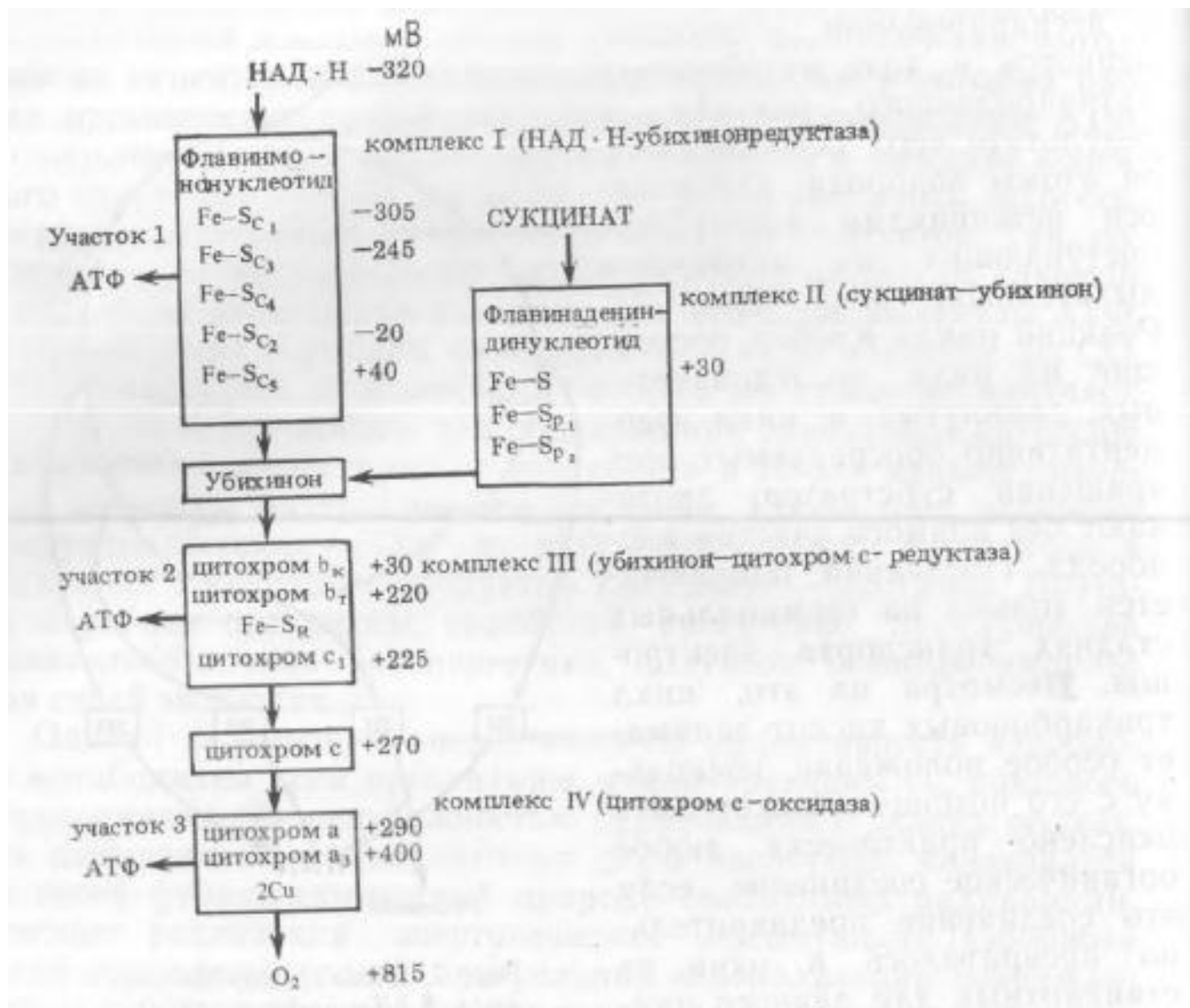


Рис. 8. Митохондриальная цепь транспорта электронов

Стрелки указывают направление транспорта электронов и участки образования АТФ. Цифры — окислительно-восстановительный потенциал (в мВ) переносчиков дыхательной цепи (Williams, 1981)

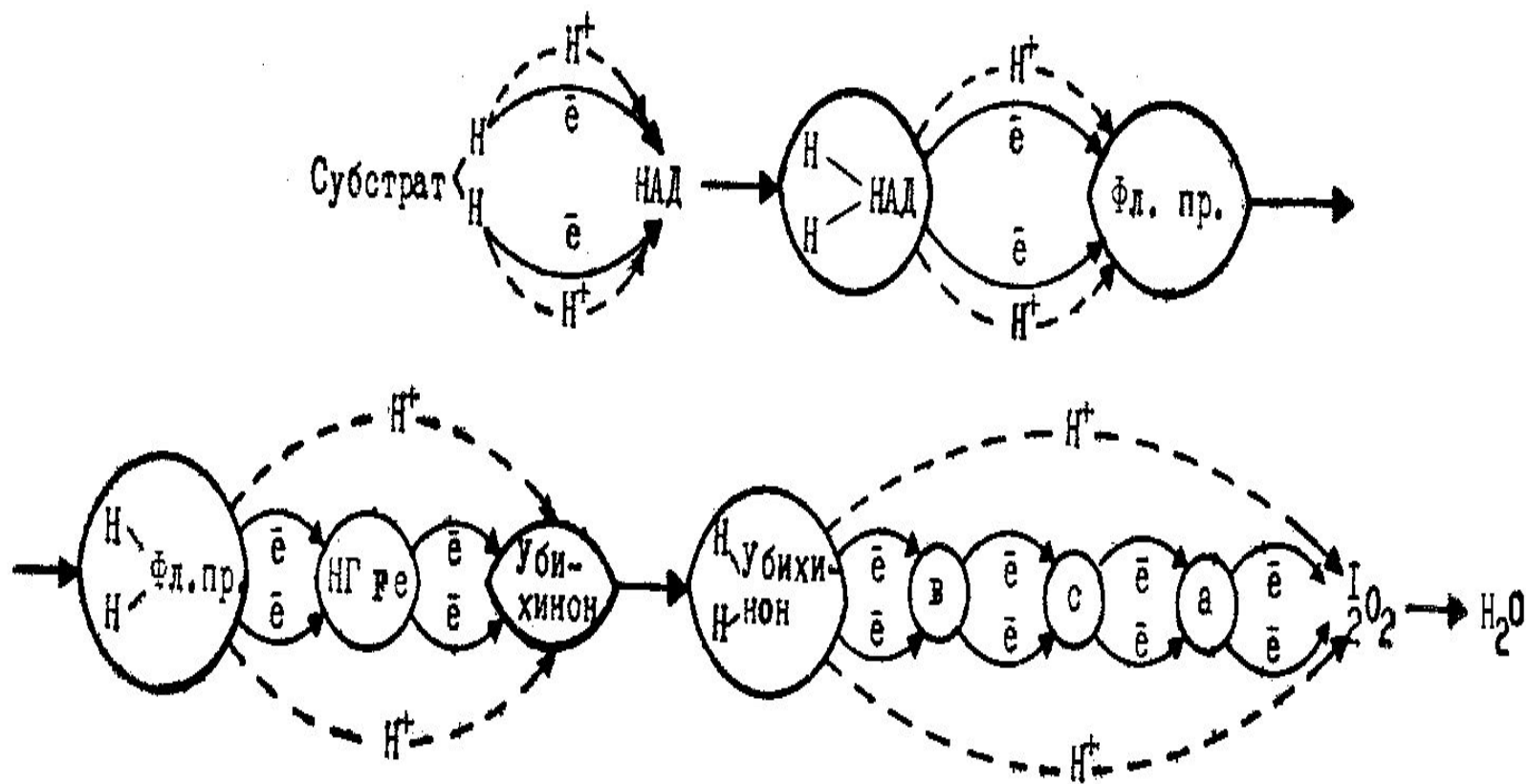
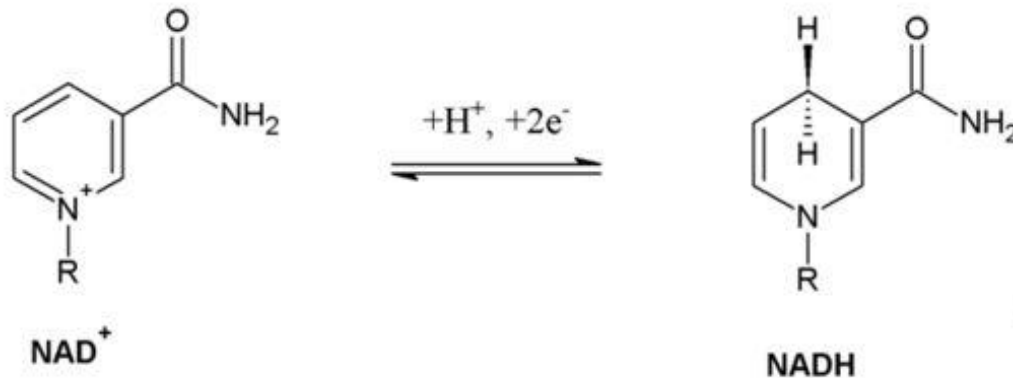
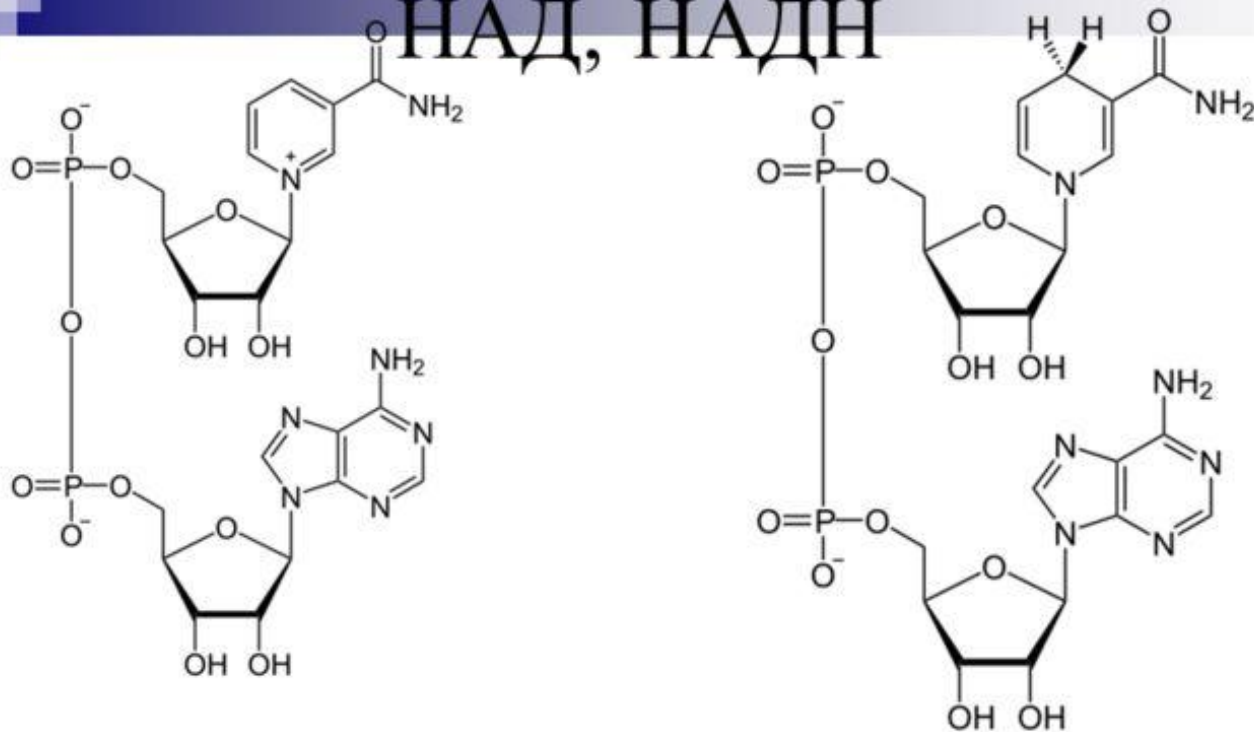


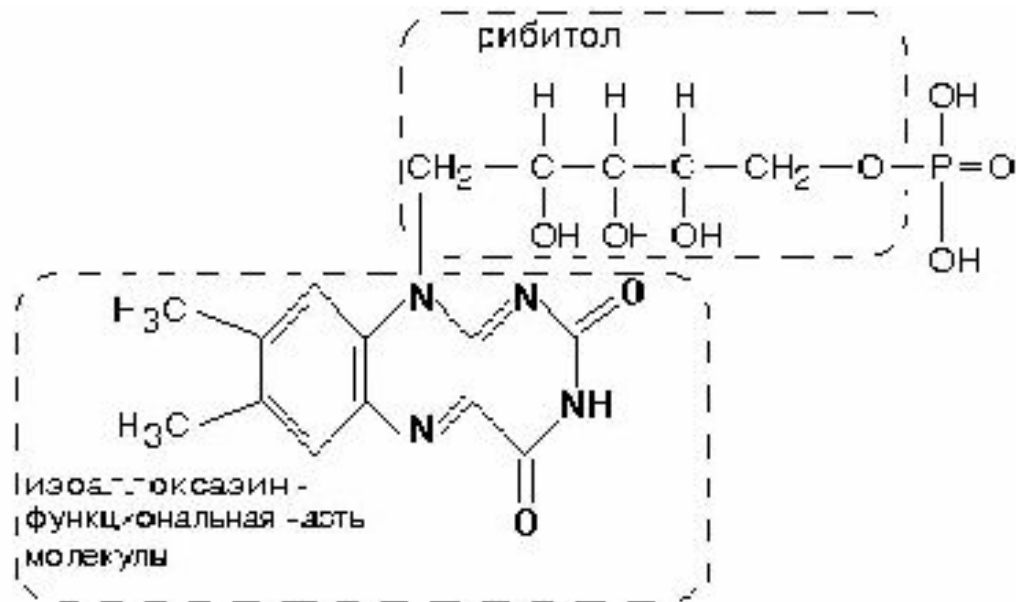
Рис. 12. Транспортировка электронов и протонов в дыхательной цепи.

НИКОТИНАМИДАДЕНИНДИНУКЛЕОТИД

НАД, НАДН

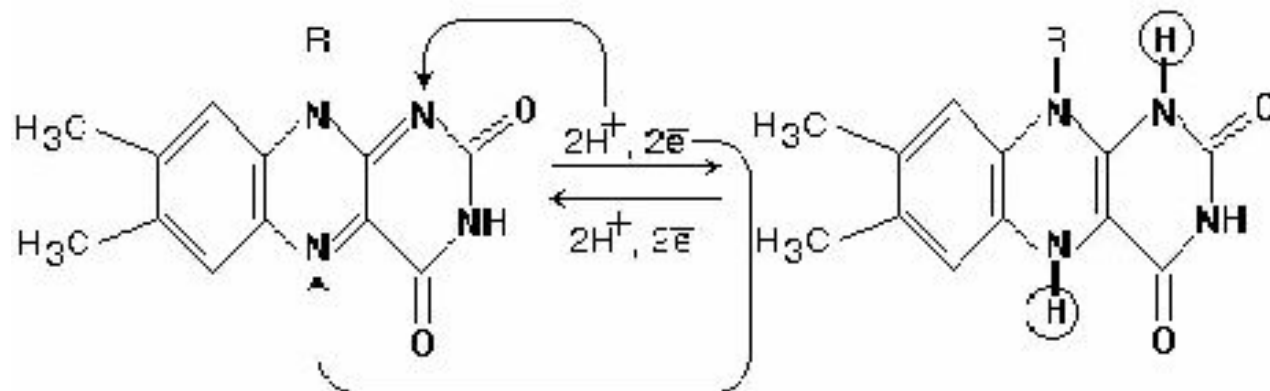


ФЛАВИНМОНОНУКЛЕОТИД

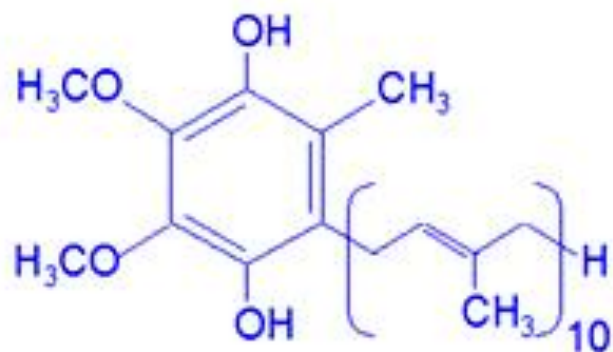


Флавиномононуклеотид (ФМН)

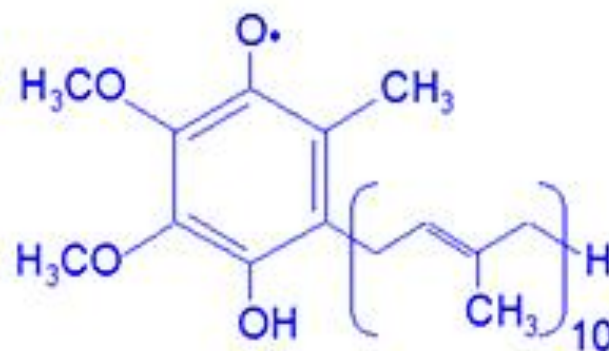
МЕХАНИЗМ УЧАСТИЯ ФМН В ПЕРЕНОСЕ ВОДОРОДА



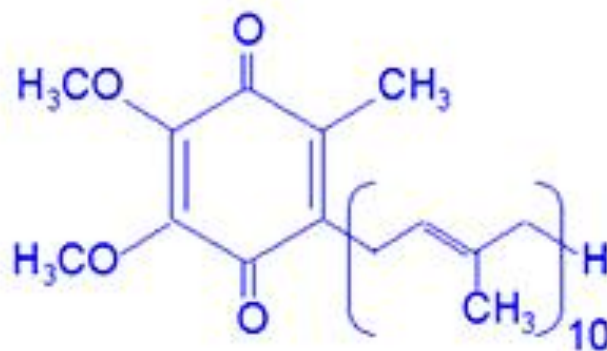
Конзим Q (КоQ)



Убихинол (CoQH₂)



Семихинон
(свободный радикал, CoQH[•])

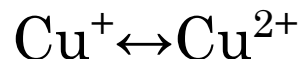
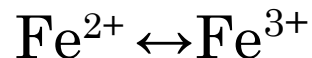


Убихинон (CoQ)

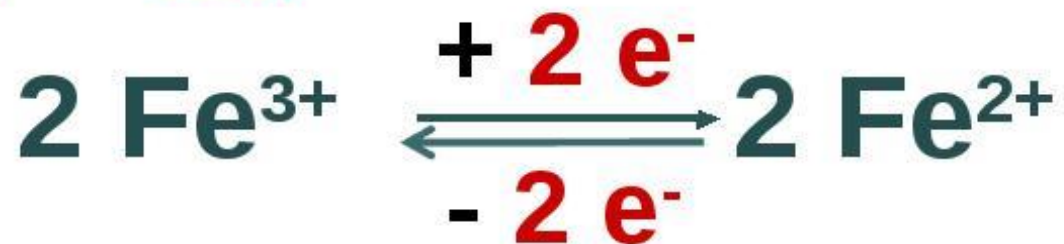
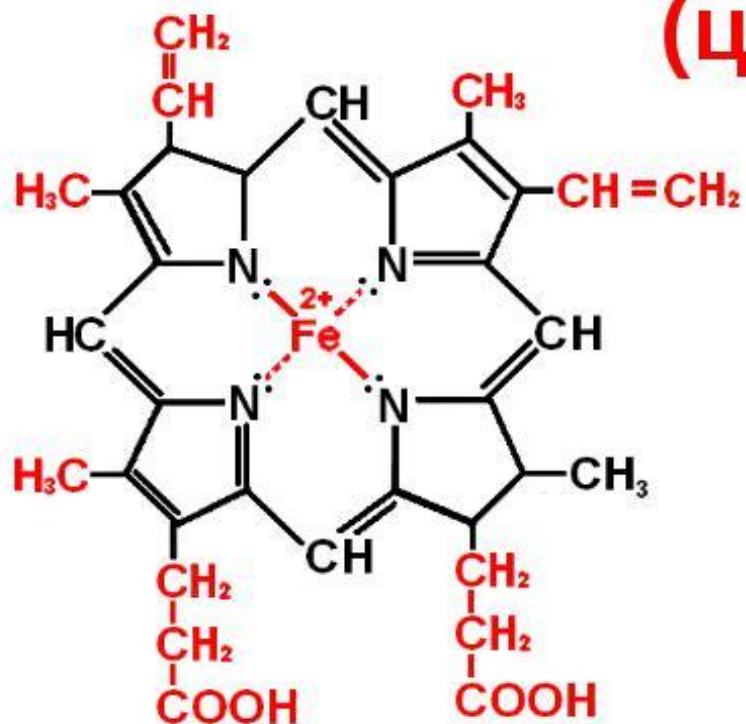


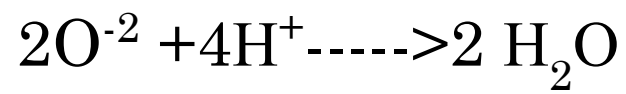
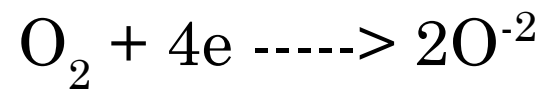
ЦИТОХРОМЫ

- Дальнейший перенос электронов от КоQ на кислород осуществляется системой цитохромов, состоящих из ряда гемопротеинов, расположенных в порядке возрастания окислительно-восстановительных потенциалов, что обеспечивает упорядоченную передачу электронов.
- Цитохромы а и а₃ содержат в своем составе дополнительно и атом меди
- При транспорте электронов в направлении увеличения окислительно-восстановительных потенциалов происходят следующие процессы:



Переносчики электронов (цитохромы)



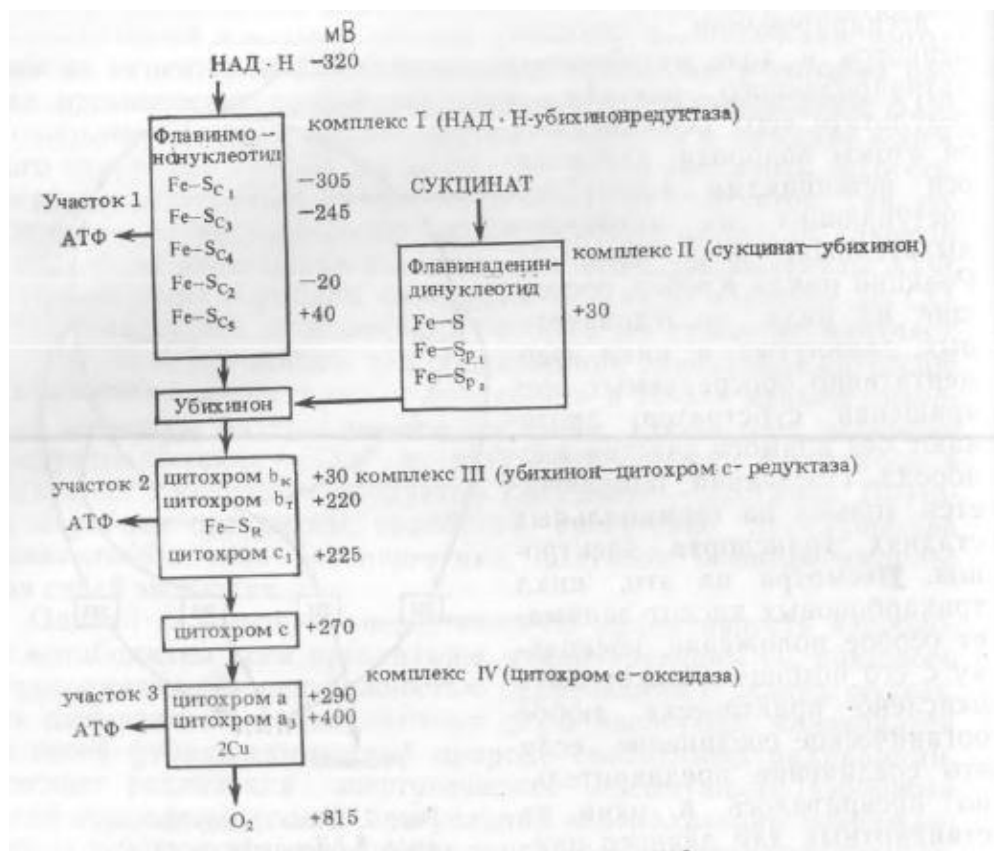


Механизм биологического окисления

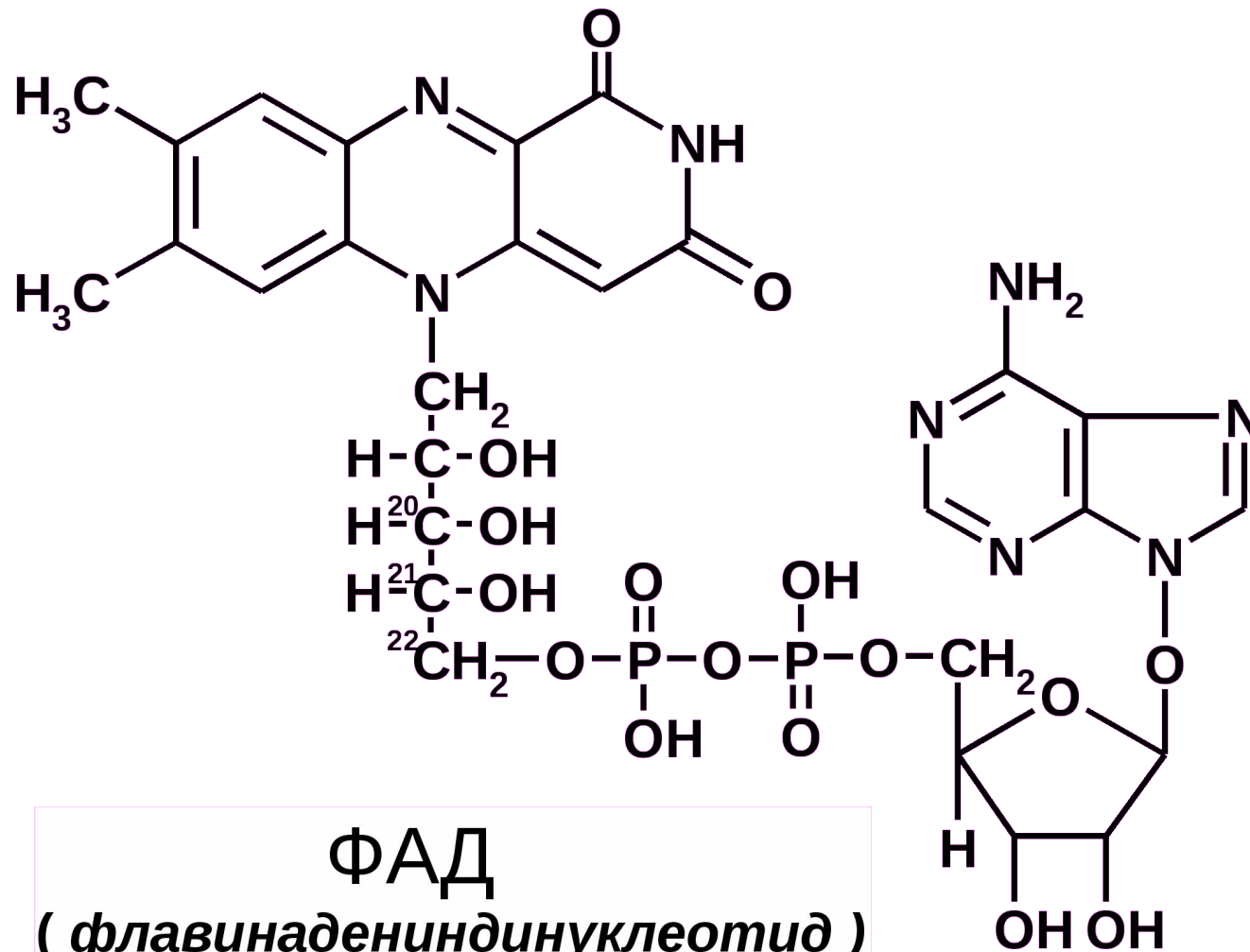


УКОРОЧЕННАЯ (СОКРАЩЕННАЯ, НЕПОЛНАЯ) ЦЕПЬ

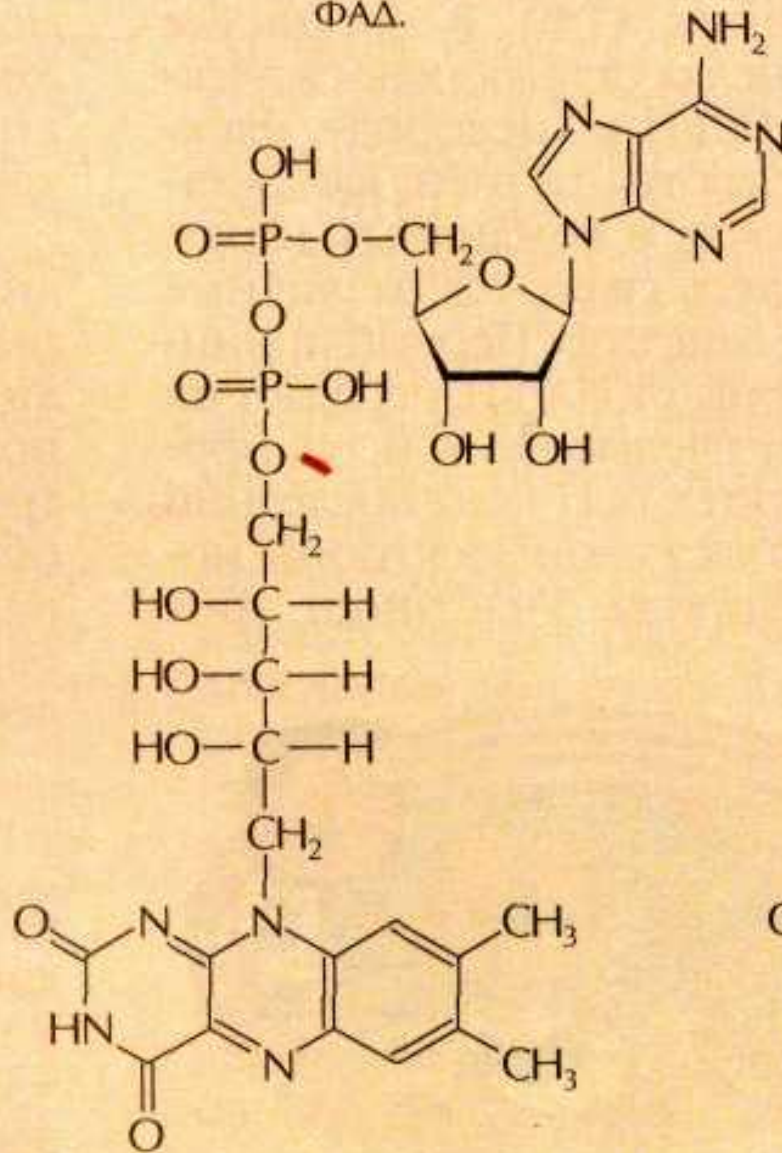
- Взаимодействие субстрата с ФАД, минуя стадии с НАД и ФМН, поэтому энергетический выход 2 молекулы АТФ



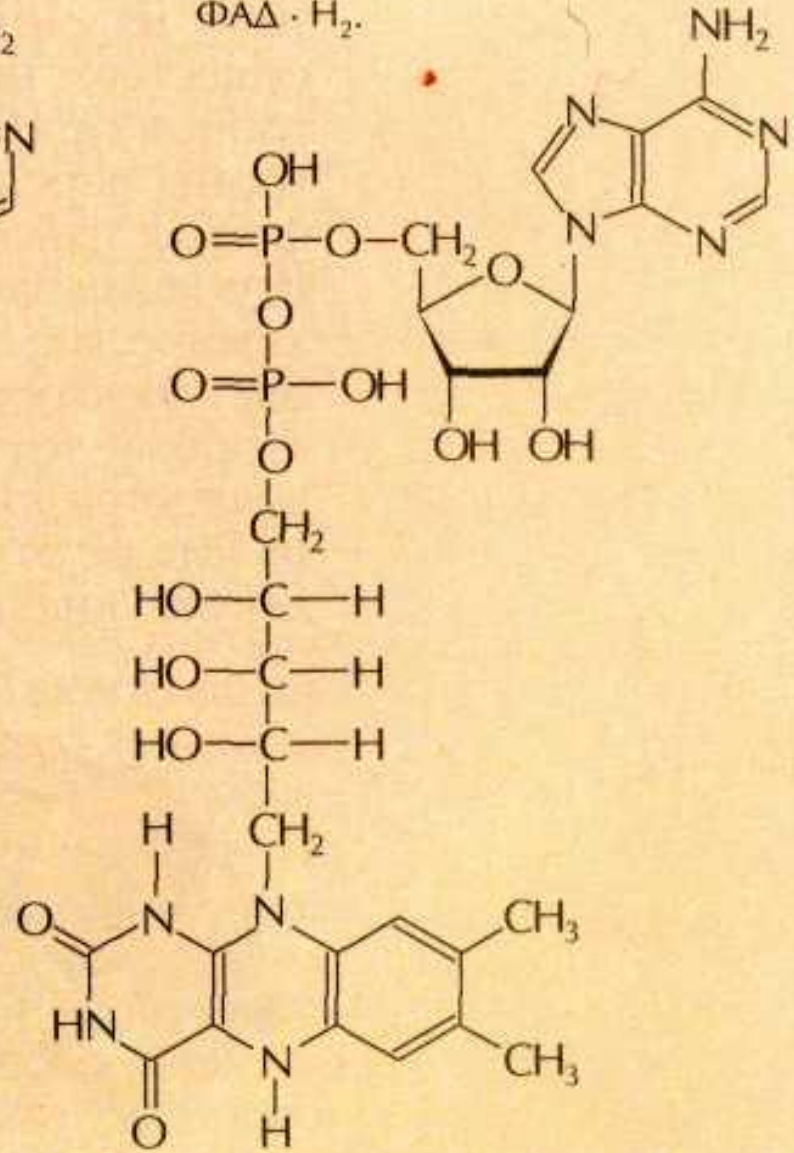
СТРУКТУРА ФАД



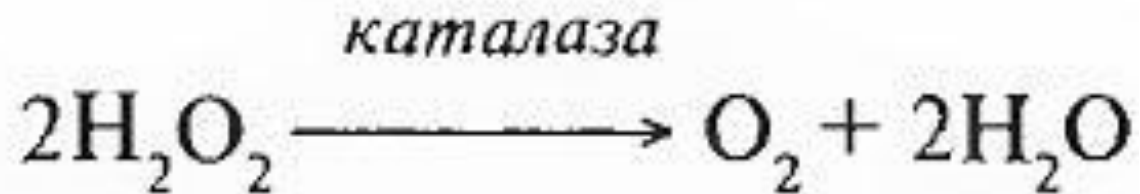
ФАД.



ФАД · H₂.



МАКСИМАЛЬНО УКРОЧЕННАЯ (МАКСИМАЛЬНО СОКРАЩЕННАЯ) ЦЕПЬ



ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ ФОСФОРИЛИРОВАНИЕ

- Процесс синтеза АТФ из АДФ и H_3PO_4 , за счёт энергии транспорта электронов по ЦПЭ называется ***окислительным фосфорилированием***



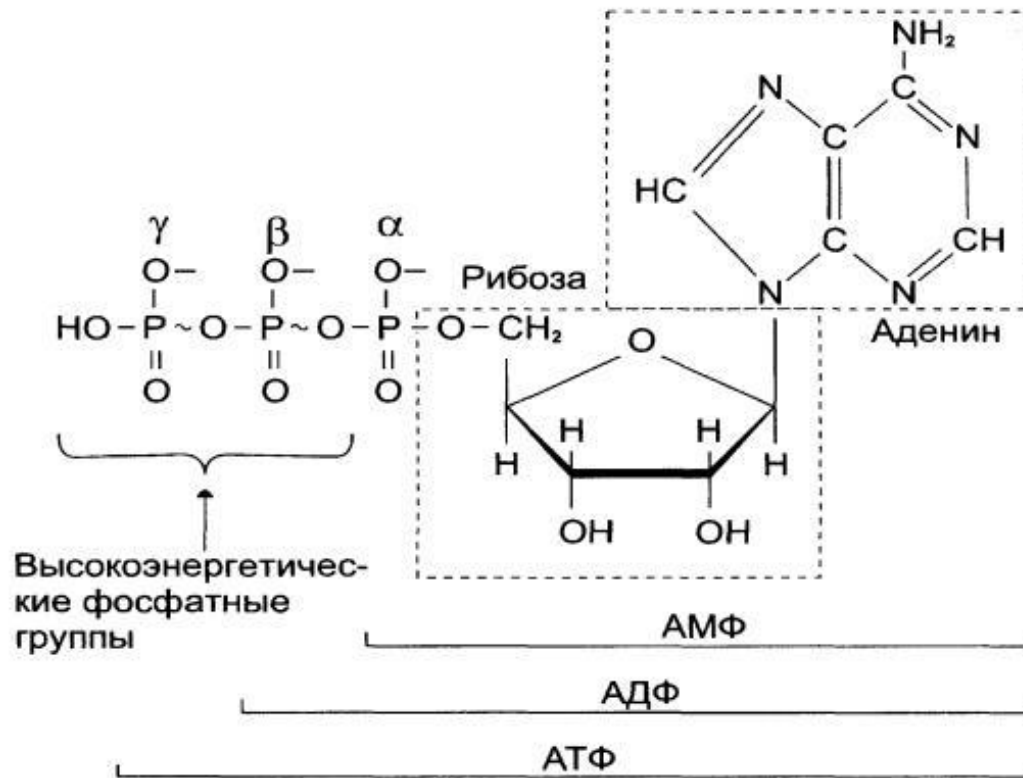
- Процессы окисления в дыхательной цепи и синтез АТФ тесно взаимосвязаны (**сопряжены**).
- При этом ведущим процессом является транспорт электронов, а сопутствующим является фосфорилирование.
- Участки дыхательной цепи, на которых происходит синтез АТФ, называются *участками сопряжения*.
- в **полной** цепи их три (I, III, IV окислительные комплексы) – **3 молекулы АТФ**
- В **короткой** дыхательной цепи их два (III IV комплексы) – **2 молекулы АТФ**

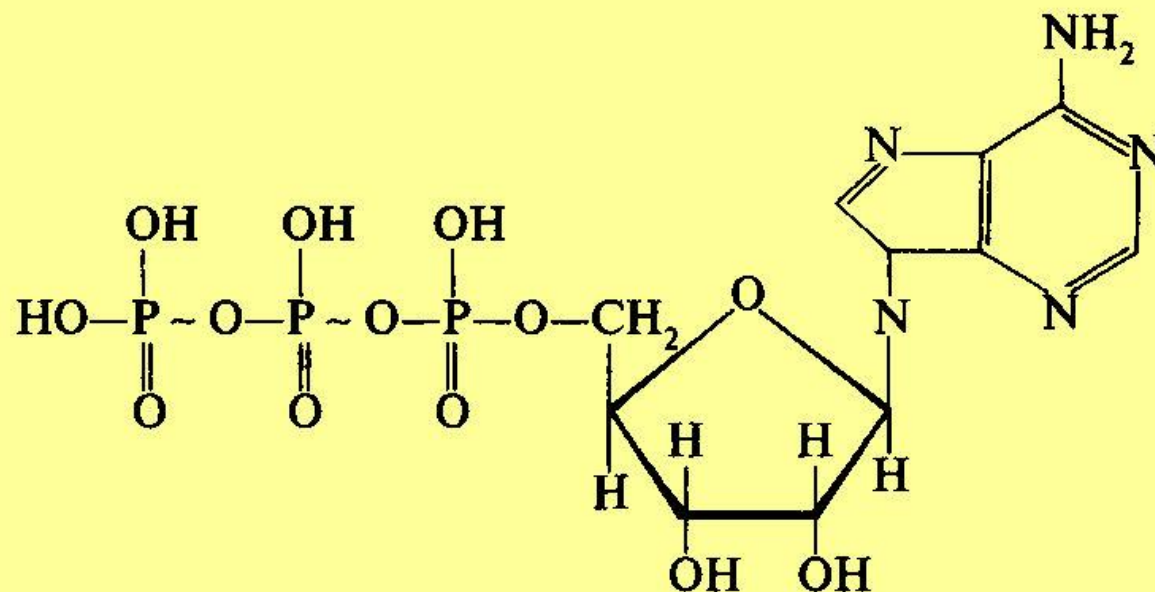


Пути синтеза АТФ



Аденозинтрифосфорная кислота (АТФ)





Структура АТФ