

# МЕТАБОЛИЗМ ПРОКАРИОТ



**Обмен веществ (метаболизм) – это совокупность протекающих в клетке биохимических процессов, обеспечивающих воспроизводство биомассы**

*Энергетический метаболизм* —  
поток реакций,  
сопровождающихся  
мобилизацией энергии и  
преобразованием ее в  
электрохимическую ( $\Delta\mu_{\text{H}^+}$ ) или  
химическую (АТФ) форму  
для энергозависимых процессов

*Конструктивный метаболизм* —  
поток реакций биосинтеза за счет  
поступающих извне веществ и  
потребления свободной энергии,  
запасенной в клетке (АТФ или  
других макроэнергетических  
соединения)

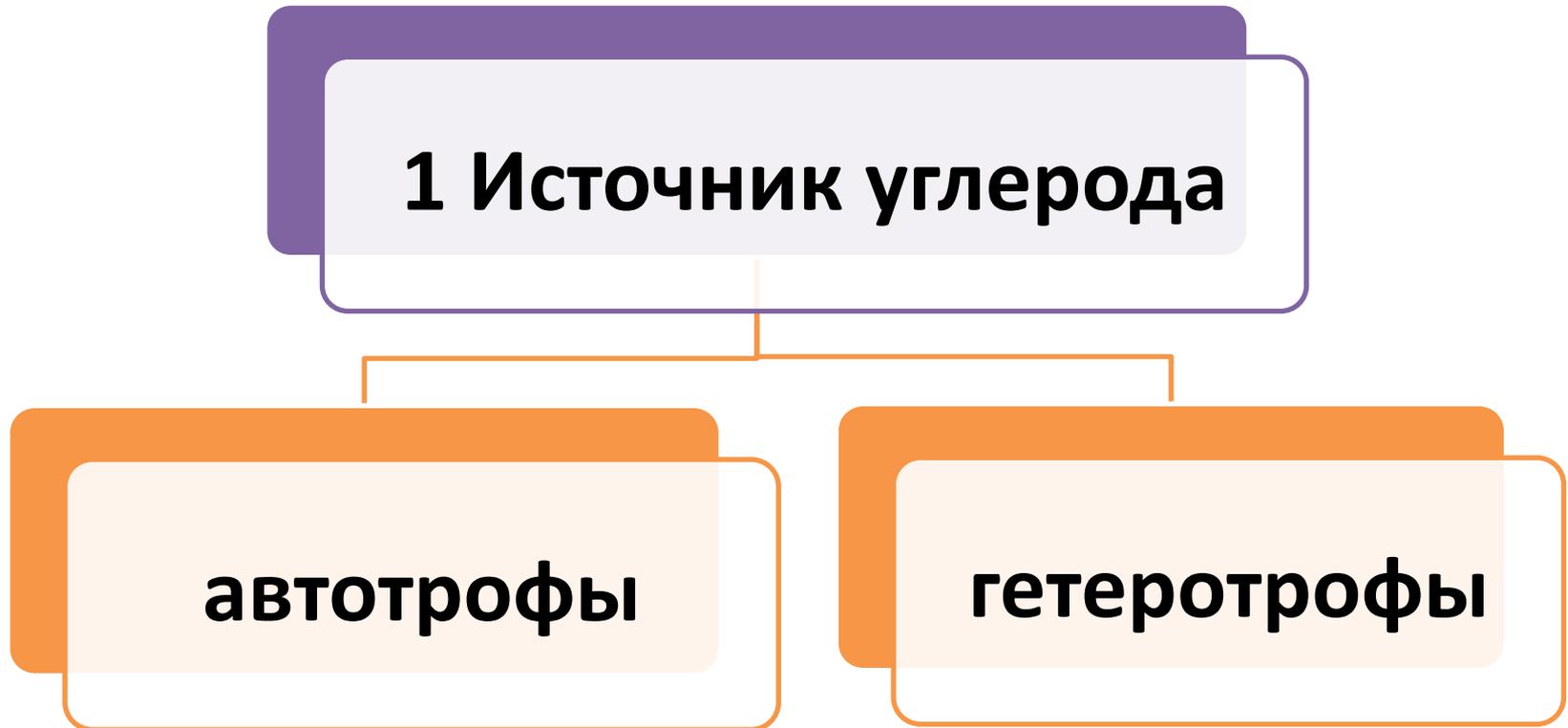
# Метаболические пути в клетке

**Периферический  
метаболизм  
(начальный этап)**

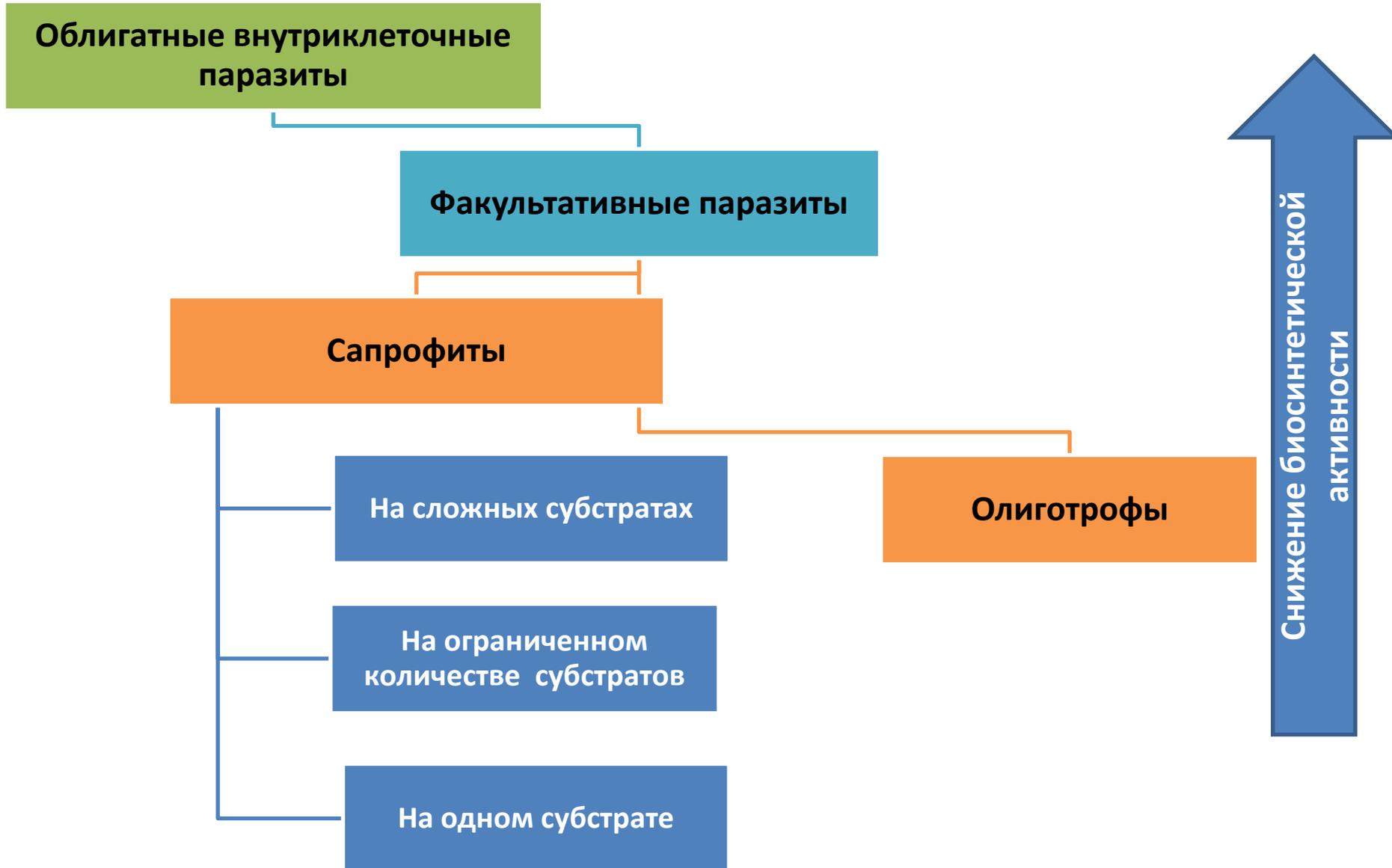
**Промежуточный  
метаболизм**

**Образование  
конечных продуктов  
распада или  
синтеза**

# Потребности прокариот в питательных веществах



# Степень гетеротрофности



## 2 Источник азота

Восстановленная  
форма азота

соли аммония,  
мочевины,  
аминокислоты,  
пептиды

Аммонификаторы

Окисленная форма  
азота

$\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$

Нитрификаторы  
денитрификаторы

Молекулярная  
форма

$\text{N}_2$

Азотфиксаторы

# Виды энергии

```
graph TD; A[Виды энергии] --> B[Механическая]; A --> C[Химическая]; A --> D[Физическая]; A --> E[Ядерная]; A --> F[Тепловая]; C --> G[Энергия окисления химических соединений]; D --> H[Электромагнитная энергия];
```

Механическая

Химическая

Физическая

Ядерная

Тепловая

Энергия окисления  
химических  
соединений

Электромагнитная  
энергия

# Метаболические группы прокариот

- 1. фотоавтотрофы**  
(цианобактерии, серные, пурпурные бактерии)
- 2. фотогетеротрофы**  
(галобактерии, осуществляющие родопсиновый фотосинтез, некоторые пурпурные бактерии, осуществляющие аноксигенный фотосинтез)
- 3. хемолитоавтотрофы**  
(метановые и сульфатредуцирующие бактерии *Tiobacteriaceae*, *Nitrobacteriaceae*)
- 4. хемолитогетеротрофы**  
(железобактерии, термоацидофильные сульфатредуцирующие и метановые бактерии)
- 5. хемоорганавтотрофы**  
(сульфатредукторы, которые в качестве источника энергии используют формиат, реже метанол)
- 6. хемоорганогетеротрофы**  
(большинство грамположительных бактерий; *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *E.coli*).

# ГЕТЕРОТРОФНЫЙ МЕТАБОЛИЗМ

При протекании химических реакций в живом организме самопроизвольно идут те процессы, в которых изменение свободной энергии будет отрицательным ( $-\Delta G$ ). Такие процессы называются **экзергоническими**.

Процессы, для которых  $\Delta G$  является величиной положительной, называются **эндергоническими**. Эти процессы не могут происходить самопроизвольно - необходим **приток энергии извне и начальные продукты реакции должны быть высоко активированы** с помощью макроэргических соединений.

# Макроэргические соединения прокариот

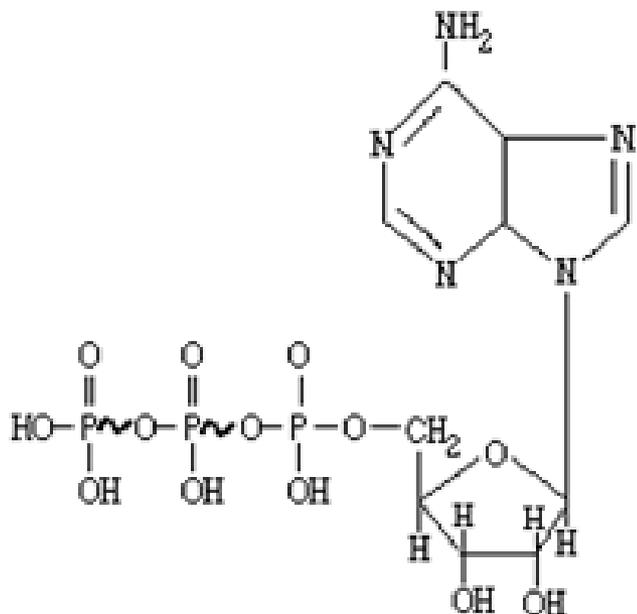
## 1) Соединения с высокоэнергетической фосфатной связью

– ацилфосфаты, фосфорные эфиры енолов (фосфоенолпируват), нуклеотидди- и трифосфаты, аденозинфосфосульфат.

## 2) Соединения с высокоэнергетической тиоэфирной связью

— ацилтиоэфиры

<b>Макроэргическое соединение</b>	<b>Процессы, в которых они участвуют</b>
1. <b>АТФ</b> (аденозинтрифосфат) и его производные – АДФ, АМФ	Универсальная форма химической энергии в клетке
2. <b>НАДФ</b> (никотинамиддинуклеотидфосфат)	Переносчик протонов и электронов от органических веществ на энергетически более низкие субстраты
3. <b>ГТФ</b> (гуанинтрифосфат)	Активизация аминокислот при биосинтезе белка
4. <b>УТФ</b> (урединтрифосфат)	Активизация предшественников при биосинтезе пептидогликанов
5. <b>ЦТФ</b> (цитидинтрифосфат)	Активизация предшественников при биосинтезе фосфолипидов ЦПМ
6. <b>ДТТФ</b> (дезокситимидинтрифосфат)	Активизация предшественников при биосинтезе липополисахаридов клеточной стенки
7. <b>Ацил-S CoA</b>	Биосинтез жирных кислот
8. <b>ФЕП</b> (фосфоенолпируват)	Фиксация CO <sub>2</sub> (автотрофный метаболизм)



**АТФ (аденозинтрифосфат)**



# Энергодающие процессы прокариот

1. **отрыв электрона**:  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^{-}$

2. **отрыв водорода** (дегидрирование) либо независимое удаление двух протонов и двух электронов:



3. **отрыв молекулы воды** - дегидратация

# Способы получения энергии у прокариот

```
graph TD; A[Способы получения энергии у прокариот] --> B[Субстратное фосфорилирование]; A --> C[Мембранзависимое фосфорилирование]; B --> D[Брожение]; C --> E[Окислительное фосфорилирование (дыхание)]; C --> F[Фотофосфорилирование (фотосинтез)];
```

Субстратное  
фосфорилирование

Брожение

Мембранзависимое  
фосфорилирование

Окислительное  
фосфорилирование  
(дыхание)

Фотофосфорилирование  
(фотосинтез)

**1. Брожение** – энергодающий процесс, в котором энергия образуется в реакциях **субстратного фосфорилирования** на определенных окислительных этапах брожения.

Источником образования АТФ служат реакции двух типов:

I. **Субстрат ~ Ф + АДФ → субстрат + АТФ**

II. **Субстрат ~ X + АДФ + Ф<sub>H</sub> → субстрат + X + АТФ**

В реакциях I типа осуществляется перенос высокоэнергетической фосфатной группы от молекулы-донора на АДФ.

В реакциях II типа энергия запасается в фосфатной связи ГТФ, который затем отдает фосфатную группу АДФ (например, образование янтарной кислоты в цикле Кребса).

**2. Дыхание** – энергодающий процесс, в котором энергия образуется в реакциях **окислительного фосфорилирования**.

Это реакции образования АТФ в процессе транспорта электронов при окислении химических соединений с относительно низким окислительно-восстановительным потенциалом ( $E_0$ ).

**Окислительно-восстановительный потенциал** ( $E_0$ ) характеризует способность веществ быть донорами или акцепторами электронов.

Чем больше отрицательная величина  $E_0$  окислительно-восстановительной системы, тем выше ее восстановительная способность (т.е. способности отдавать электроны) и наоборот.

Электроны без подведения энергии извне будут перемещаться в направлении от более электроотрицательных систем к более электроположительным.

<b>Окислительно-восстановительная система</b>	<b><math>E_0'</math>, мВ</b>
Пируват/ацетат + $\text{CO}_2$	-700
$\text{H}^+ + 1/2\text{H}_2$	-420
Ферредоксин окисл/восст	-420
НАД(Ф) <sup>+</sup> /НАД(Ф)· $\text{H}_2$	-320
$\text{S}^0/\text{HS}^-$	-270
$\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-$	-220
ФАД/ФАД· $\text{H}_2$	-220
ФМН/ФМН· $\text{H}_2$	-190
Менахинон окисл/восст	-74
Рубедоксин окисл/восст	-57
Фумарат/сукцинат	+30
Цитохром b окисл/восст	+70
Убихинон окисл/восст	+100
Цитохром c окисл/восст	+220
Цитохром a окисл/восст	+290
$\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$	+433
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	+772
$1/2 \text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$	+820

**Окисление происходит в результате переноса электронов через локализованную в мембране дыхательную **электрон-транспортную цепь****

### **Доноры электронов**

- 1) органические субстраты (у большинства прокариот)
- 2) неорганические субстраты -  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}^0$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  (с конечным акцептором  $\text{O}_2$ )

### **Акцепторы электронов**

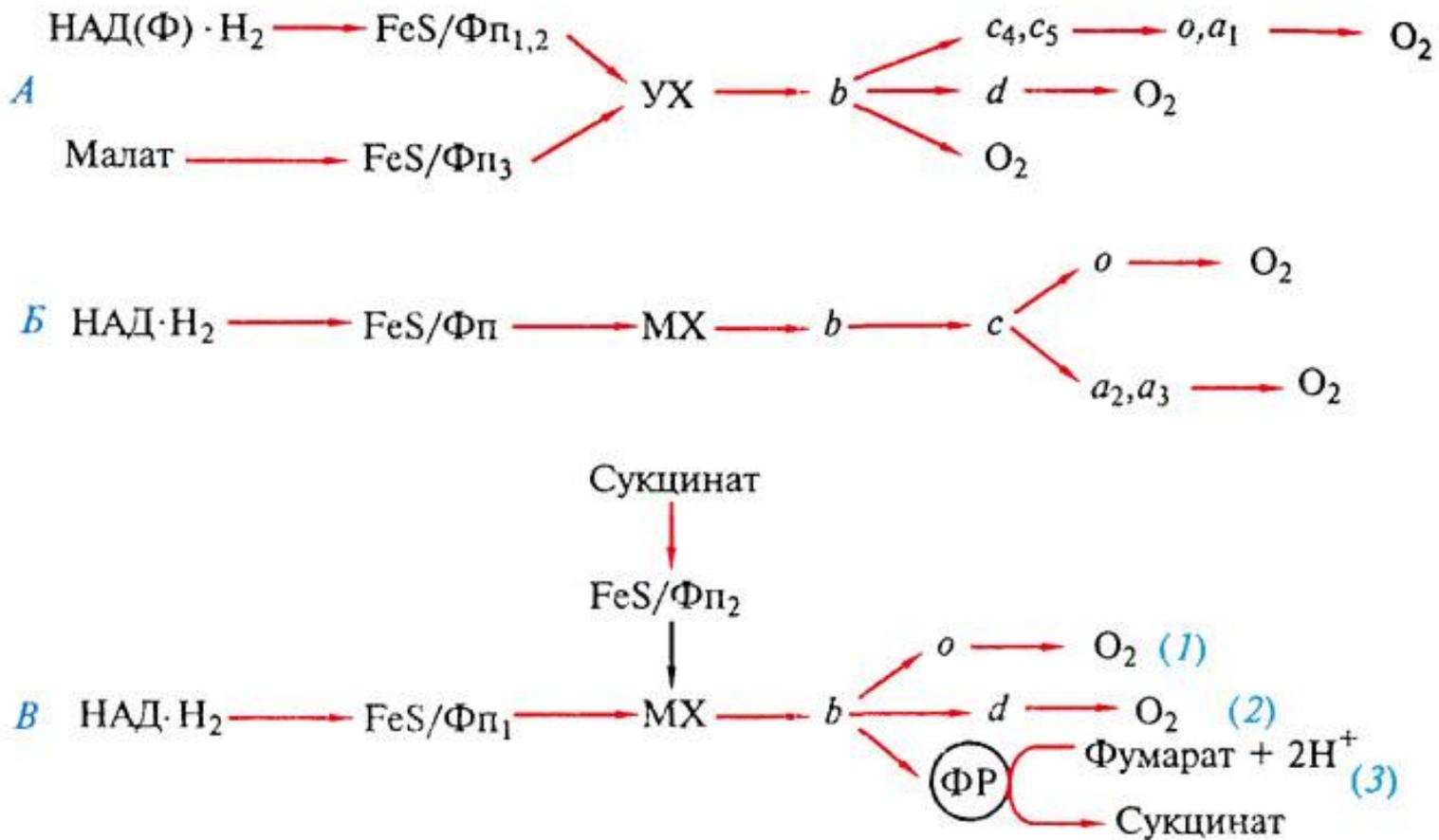
- 1)  $\text{O}_2$  – аэробное дыхание
- 2) фумарат,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{S}^0$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{S}^0$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$  и др. – анаэробное дыхание

## Переносчики ЭТЦ

1. Пиридиновые нуклеотиды (**НАДН<sub>2</sub>**, **НАДФН<sub>2</sub>**)
2. Флавиновые нуклеотиды (**ФМН**, **ФАД**)
3. Хиноны (**убихинон**)
4. Цитохромы (гемопротеиды): **в**, **с**, **а**

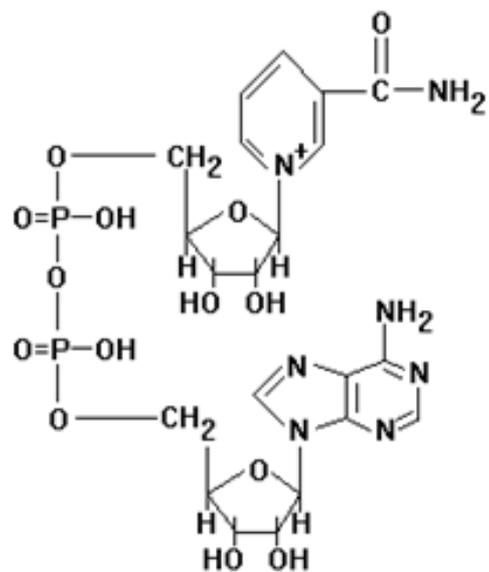
У некоторых прокариот могут быть укороченные цепи из-за отсутствия цитохрома **с**.

Большинство бактерий имеют разветвленные дыхательные цепи на уровне цитохромов из-за большого потока электронов при избытке субстрата, чтобы не образовывалась электронная пробка.

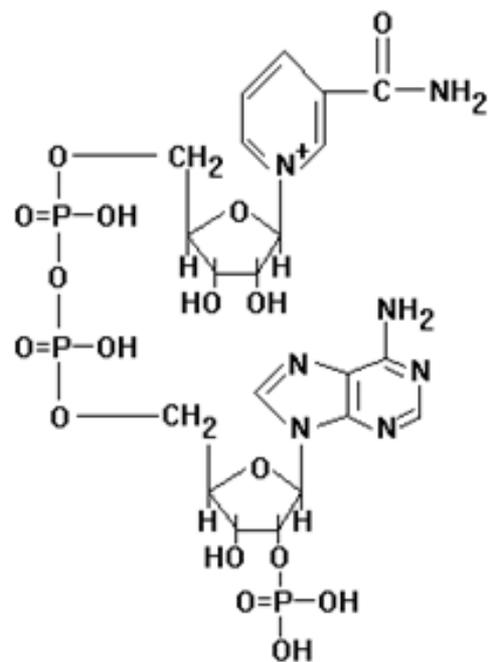


Дыхательные цепи *Azotobacter vinelandii* (А), *Micrococcus lysodeikticus* (Б) и *Escherichia coli* (В) в аэробных (1), микроаэробных (2) и анаэробных (3) условиях:

Фп - флавопротеин; FeS - железосероцентр; УХ - убихинон; МХ - менахинон; ФР - фумаратредуктаза; b, c, d, o, a - цитохромы.

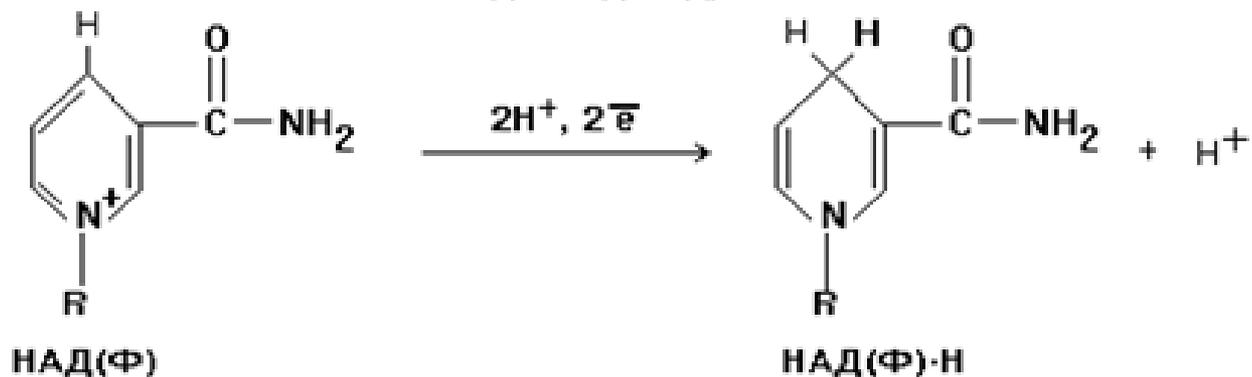


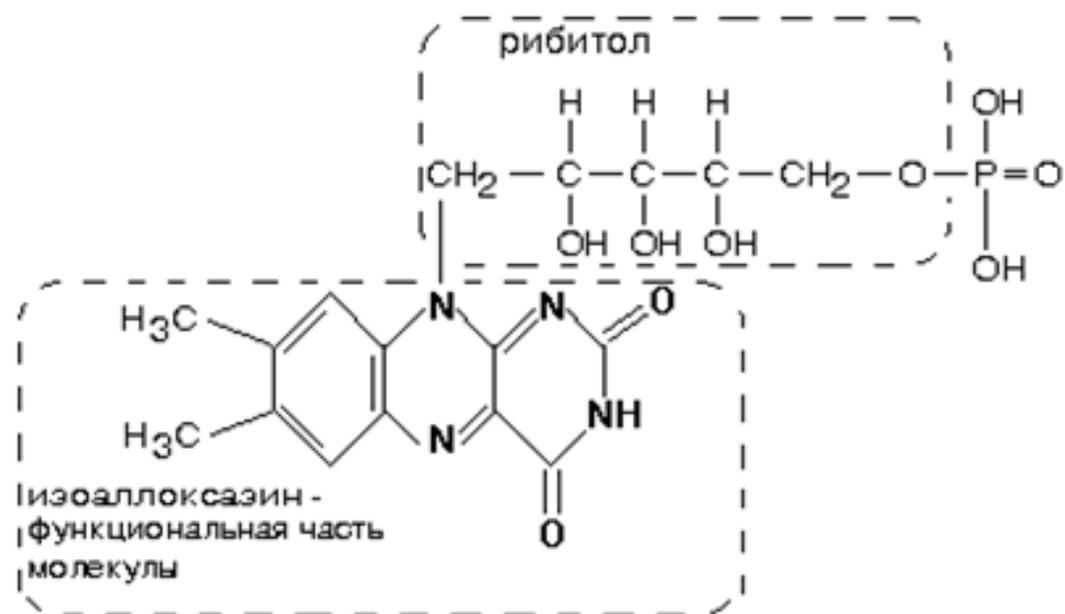
Никотинамидадениндинуклеотид  
(НАД)



Никотинамидадениндинуклеотидфосфат  
(НАДФ)

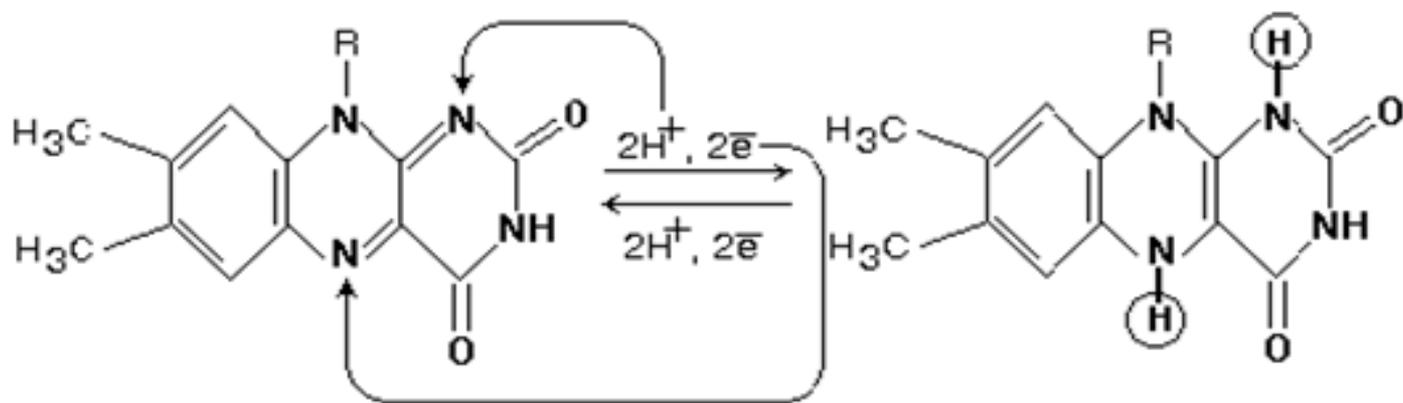
Механизм присоединения электронов и протона  
к никотинамидным дегидрогеназам

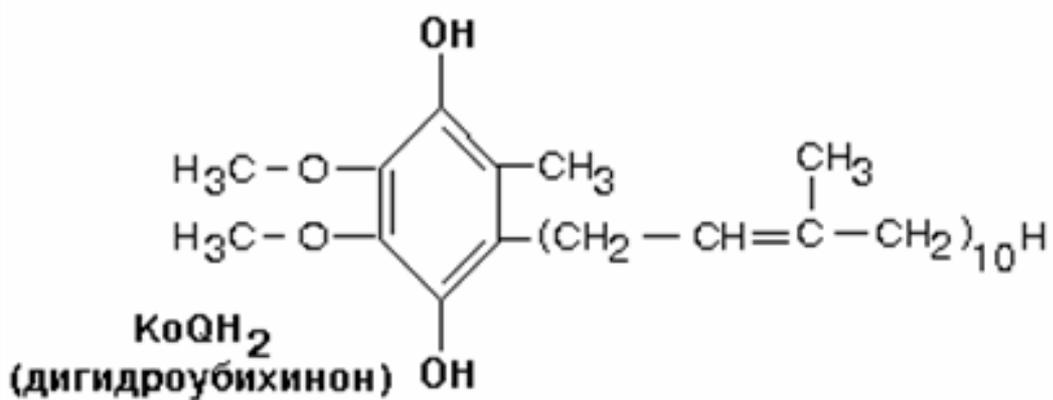
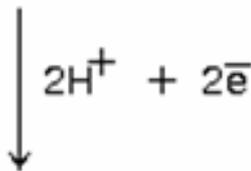
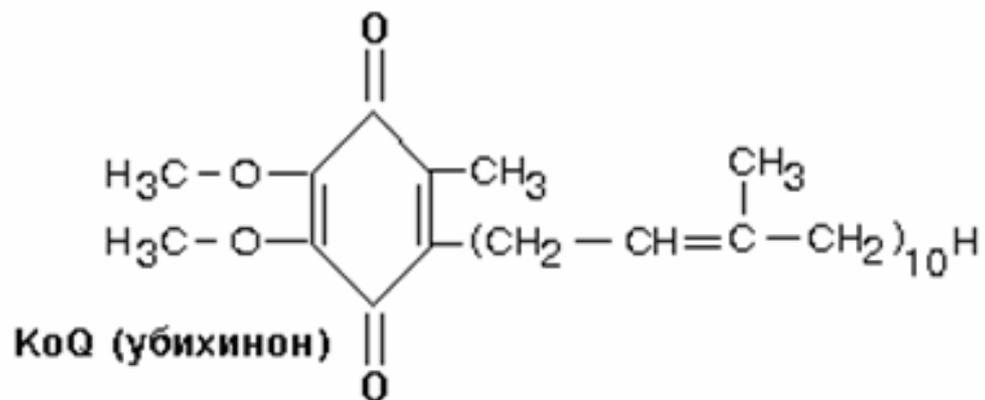




**Флавинмононуклеотид (ФМН)**

МЕХАНИЗМ УЧАСТИЯ ФМН В ПЕРЕНОСЕ ВОДОРОДА.





**3. Фотосинтез** – энергодающий процесс, в котором энергия образуется в реакциях **фотофосфорилирования**.

Синтез АТФ связан с фотосинтетическим электронным транспортом за счет энергии света.

**Компоненты фотосистемы прокариот:**

- 1) Пигментные системы – антенны.
- 2) Доноры электронов ( $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2S$ )
- 3) Цепь переносчиков: ЭТЦ содержит цитохромы, убихиноны и ферредоксины, которые передают электроны на НАД.

# Типы бактериального фотосинтеза

## 1) зависимый от бактериохлорофилла бескислородный фотосинтез

(кислород не образуется, донор электронов –  $H_2$  ;  
зеленые пурпурные бактерии и гелиобактерии)

## 2) зависимый от хлорофилла кислородный фотосинтез

(кислород образуется, донор –  $H_2O$  ;  
цианобактерии и прохлорофиты)

## 3) зависимый от бактериородопсина бескислородный фотосинтез

(экстремально галофильные архебактерии)

## **Этапы фотосинтеза I и II типа:**

- 1. поглощение солнечной энергии различными пигментами**
- 2. последующее разделение электрических зарядов**
- 3. возникновение восстановителя с низким и окислителя с высоким ОВП**
- 4. перенос электронов между этими двумя компонентами, приводящий к выделению свободной энергии.**

**В фотосинтезе III типа окислительно-восстановительные переносчики отсутствуют.**

**Энергия в доступной для организма форме возникает в результате светозависимого перемещения  $H^+$  через мембрану.**

**Общие признаки ЭТЦ прокариот,**  
функционирующих в процессах **дыхания и**  
**фотосинтеза I и II типа:**

**флавопротеины, хиноны, цитохромы и белки,**  
**содержащие негемовое железо**

**Основные различия:** набор доноров и  
акцепторов электронов, химическое строение  
переносчиков, принадлежащих к одному типу,  
набор и расположение переносчиков.

# Схема превращения полимеров

**Образование мономеров из  
полимерных соединений**

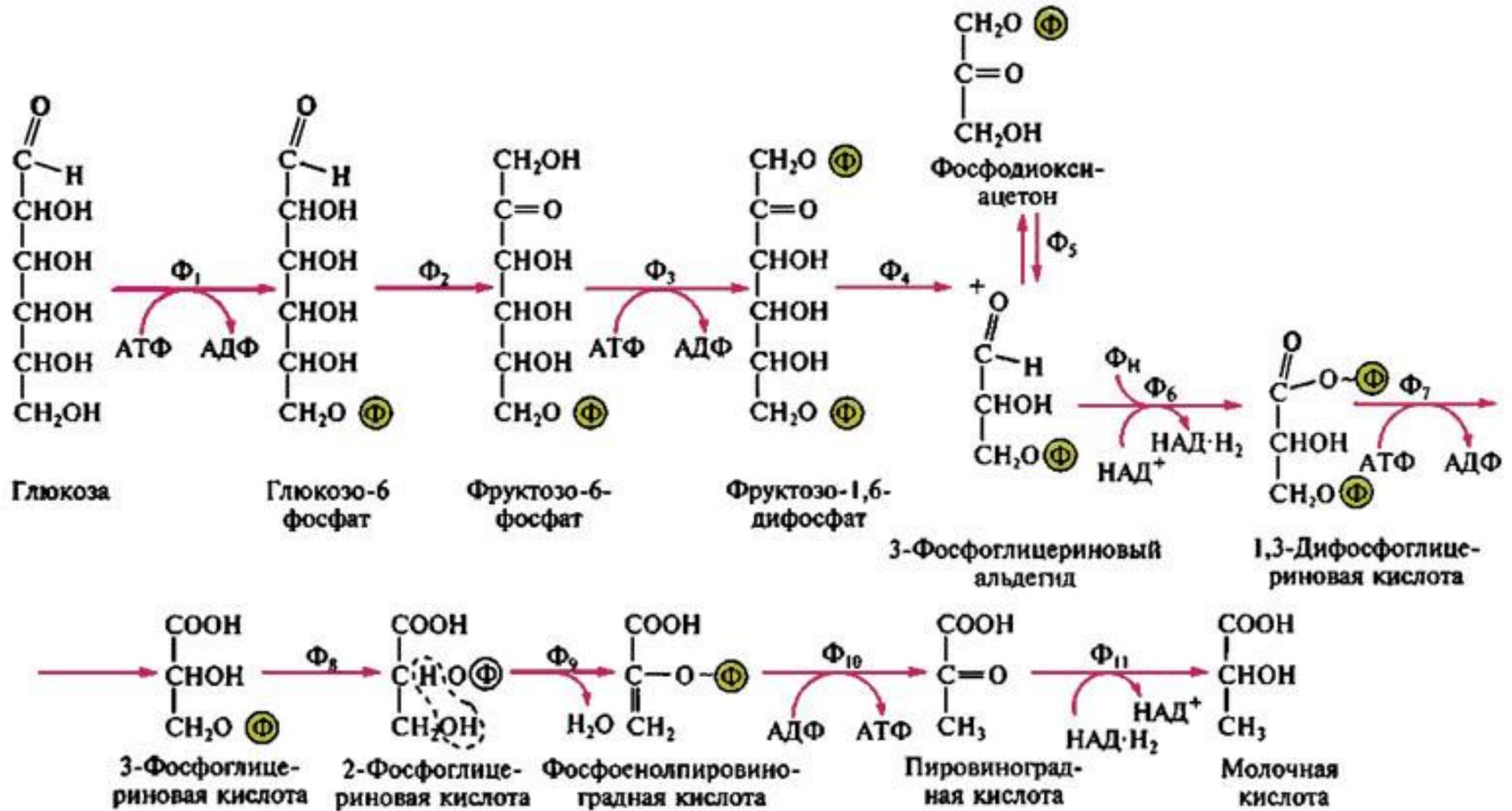
**Превращение мономеров  
в пируват (ПВК)**

**Превращение ПВК  
в конечные  
продукты**

# Пути превращения гексоз у прокариот

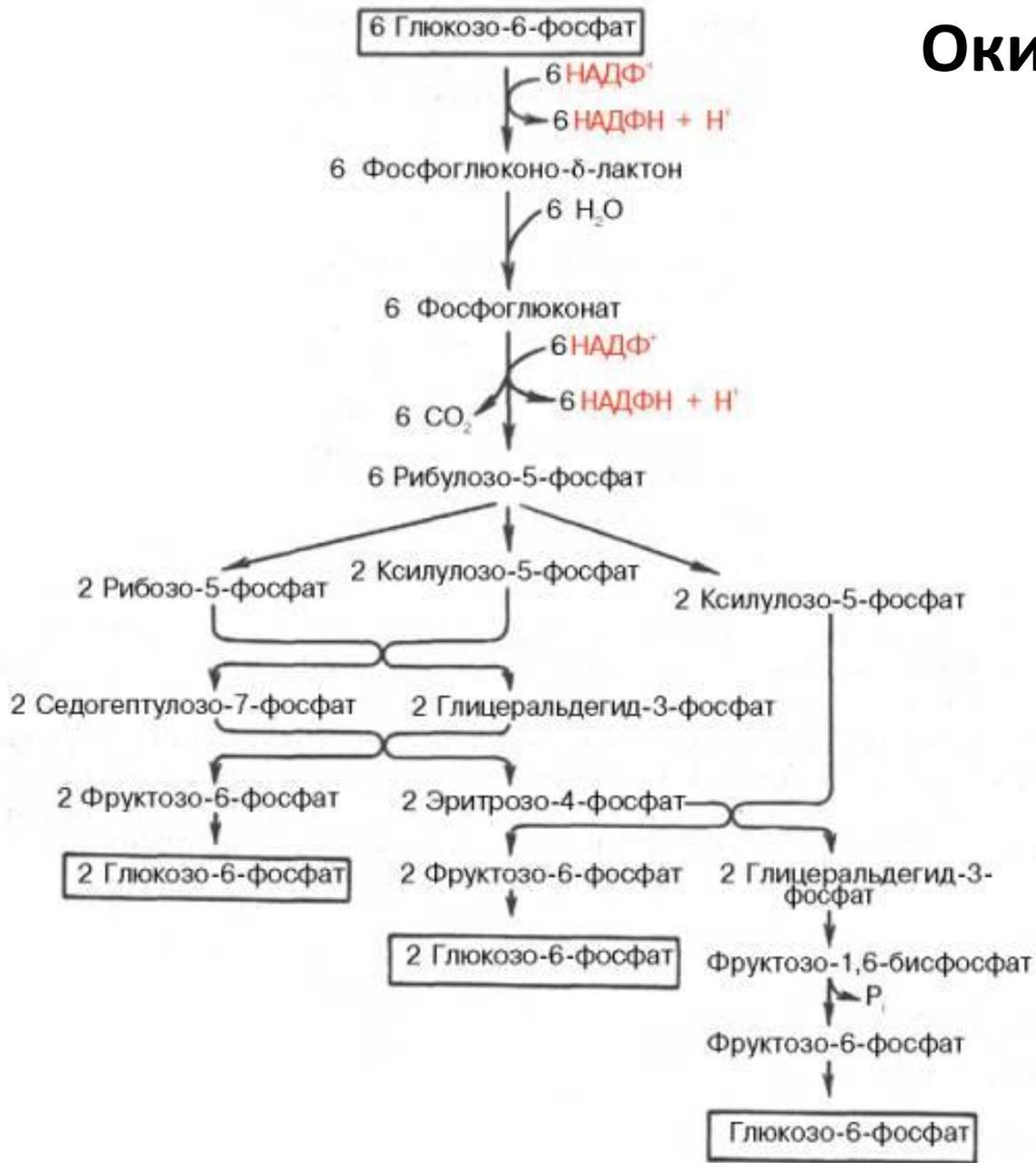
1. Гликолитический путь (путь Эмбдена — Мейергофа — Парнаса)
2. Окислительный пентозофосфатный путь
3. Путь Энтнера - Дудорова

# Гликолитический путь

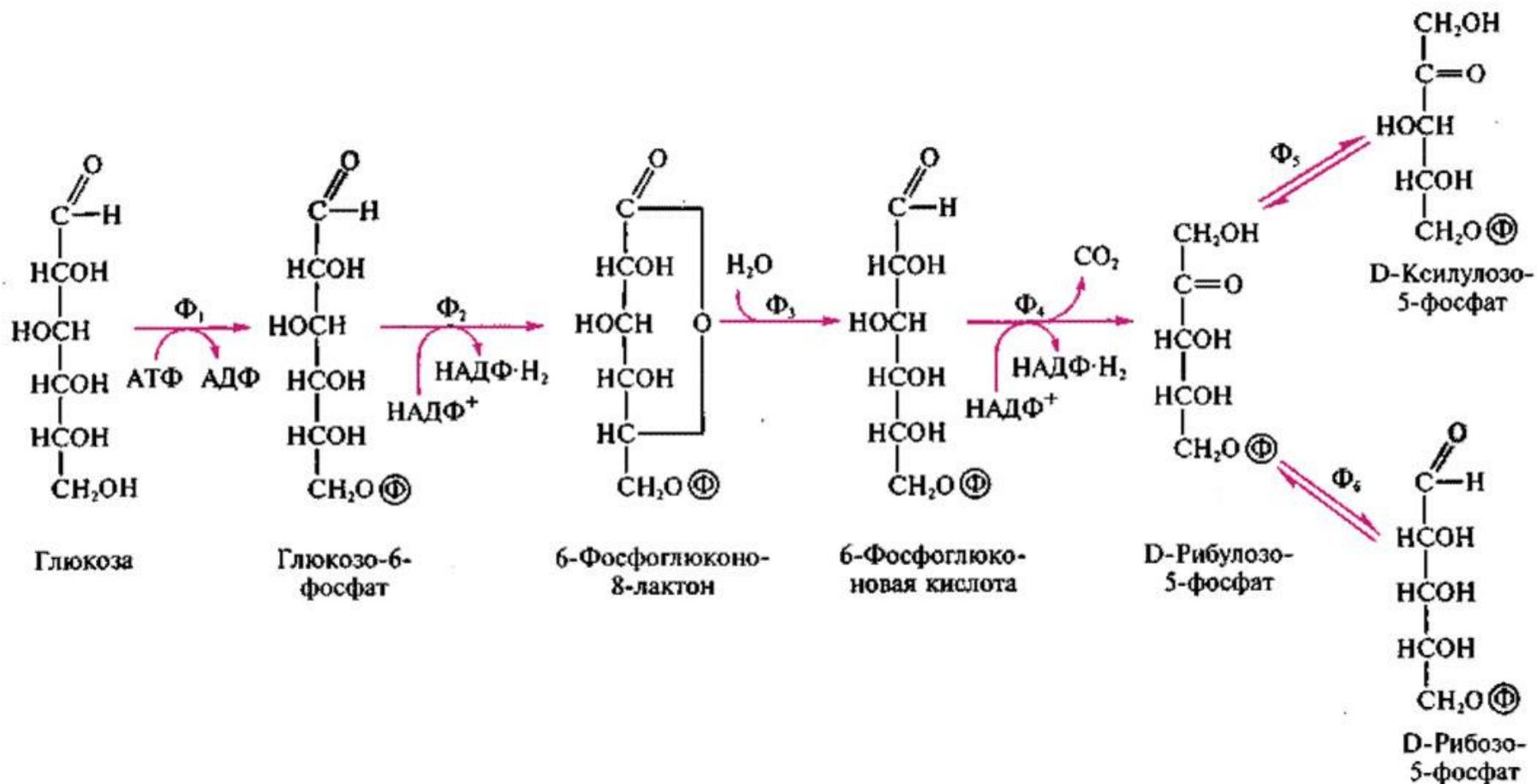


$\Phi_1$  - гексокиназа;  $\Phi_2$  - глюкозофосфатизомераза;  $\Phi_3$  - фосфотруктокиназа;  $\Phi_4$  - фруктозо-1,6-дифосфат-альдолаза;  $\Phi_5$  - триозофосфатизомераза;  $\Phi_6$  - 3ФГА-дегидрогеназа;  $\Phi_7$  - фосфоглицераткиназа;  $\Phi_8$  - фосфоглицеромутаза;  $\Phi_9$  - енолаза;  $\Phi_{10}$  - пируваткиназа;  $\Phi_{11}$  - лактатдегидрогеназа.

# Окислительный ПФП

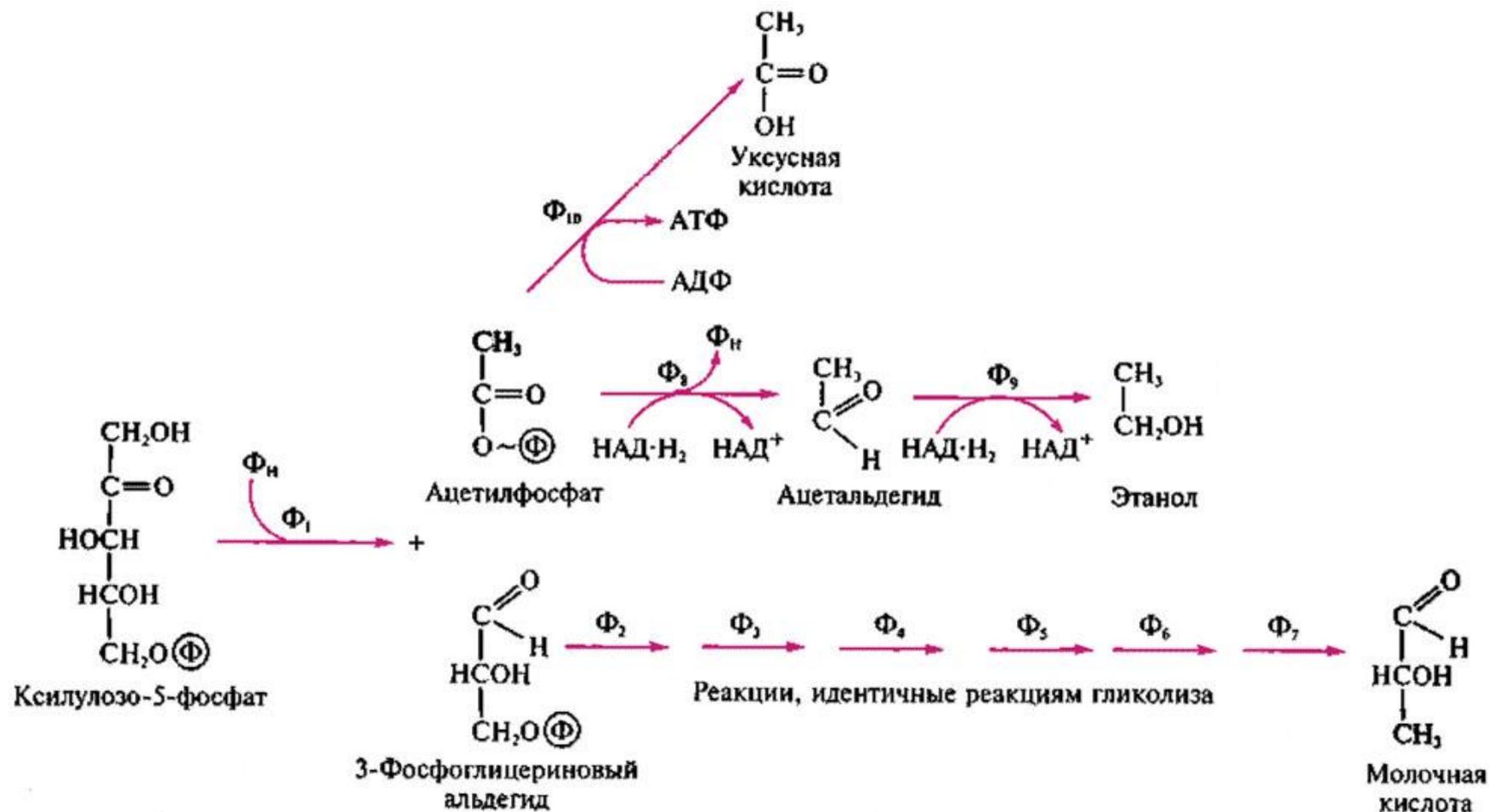


# Окислительный ПФП



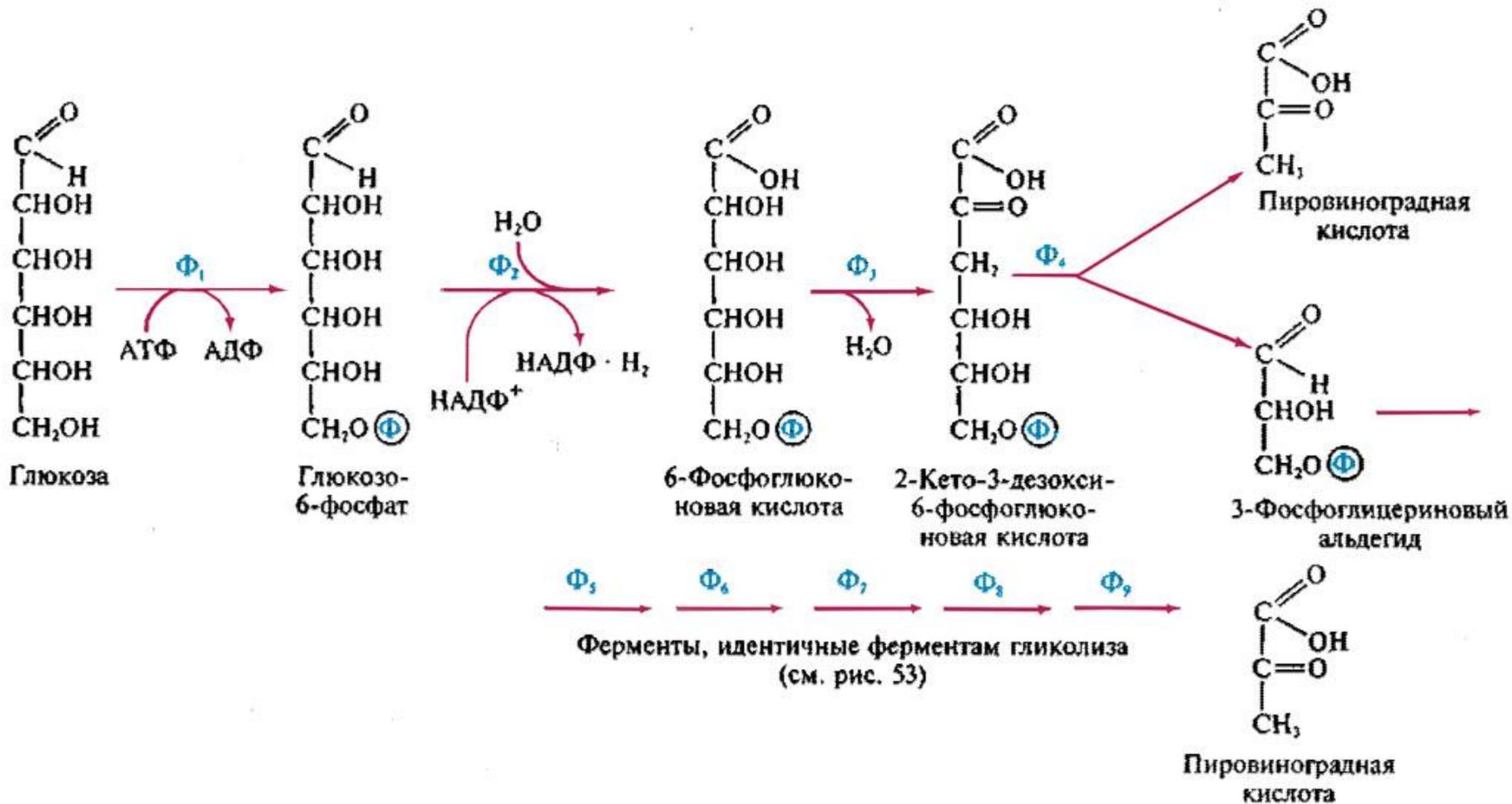
$\Phi_1$  - гексокиназа;  $\Phi_2$  - глюкозо-6-фосфатдегидрогеназа;  $\Phi_3$  - лактоназа;  $\Phi_4$  - фосфоглюконатдегидрогеназа (декарбоксилирующая);  $\Phi_5$  - фосфопентозоэпимераза;  $\Phi_6$  - фосфопентозоизомераза.

# Окислительный ПФП



$\Phi_1$  - пентозофосфокетотлаза;  $\Phi_2$  - 3-ФГА-дегидрогеназа;  $\Phi_3$  - фосфоглицераткиназа;  $\Phi_4$  - фосфоглицеромутаза;  $\Phi_5$  - енолаза;  $\Phi_6$  - пируваткиназа;  $\Phi_7$  - лактатдегидрогеназа;  $\Phi_8$  - ацетальдегиддегидрогеназа;  $\Phi_9$  - алкогольдегидрогеназа;  $\Phi_{10}$  - ацетаткиназа.

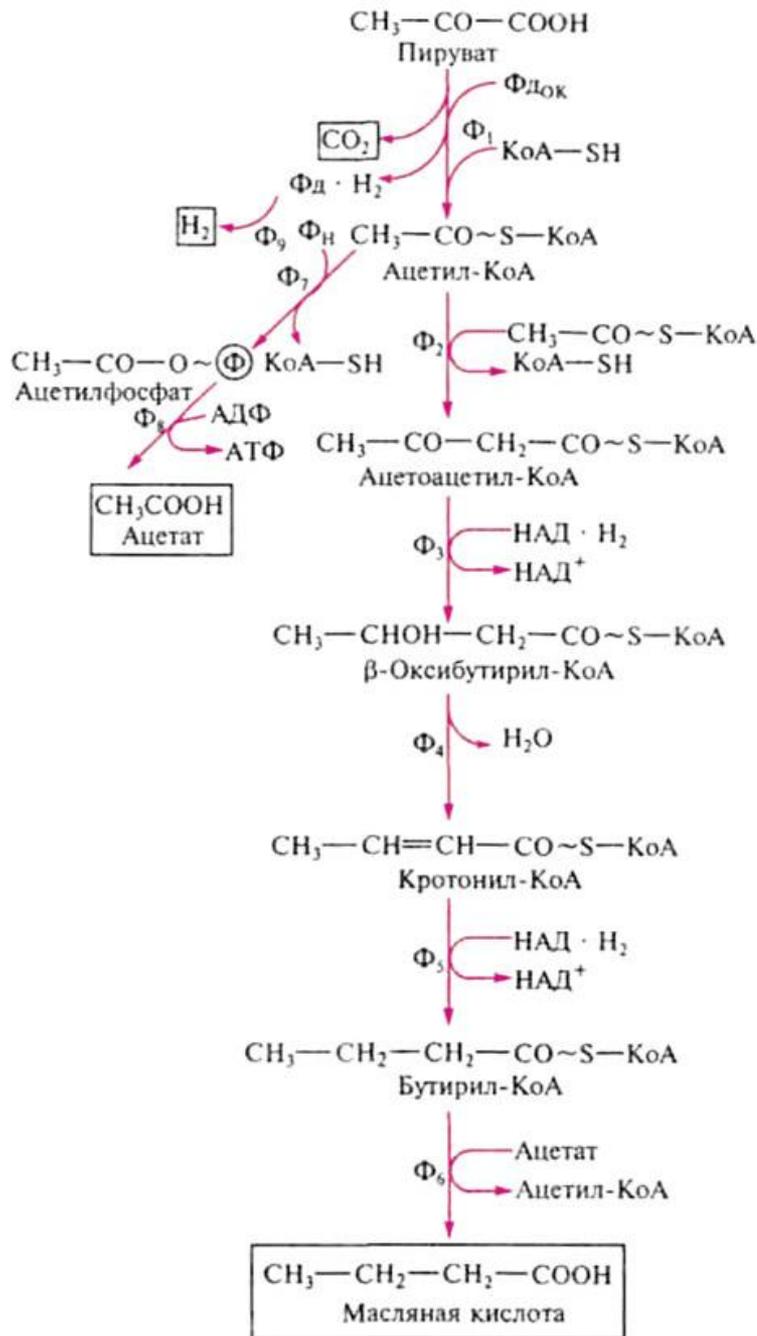
# Путь Энтнера-Дударова



Ф1 - гексокиназа; Ф2 - глюкозо-6-фосфатдегидрогеназа; Ф3 - 6-фосфоглюконат-дегидратаза; Ф4 - 2-кето-3-дезоксиглюконо-6-фосфонат-алолаза; Ф5 - глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназа; Ф6 - фосфоглицераткиназа; Ф7 - фосфоглицеромутаза; Ф8 - фосфоглицеромутаза; Ф9 - пируваткиназа



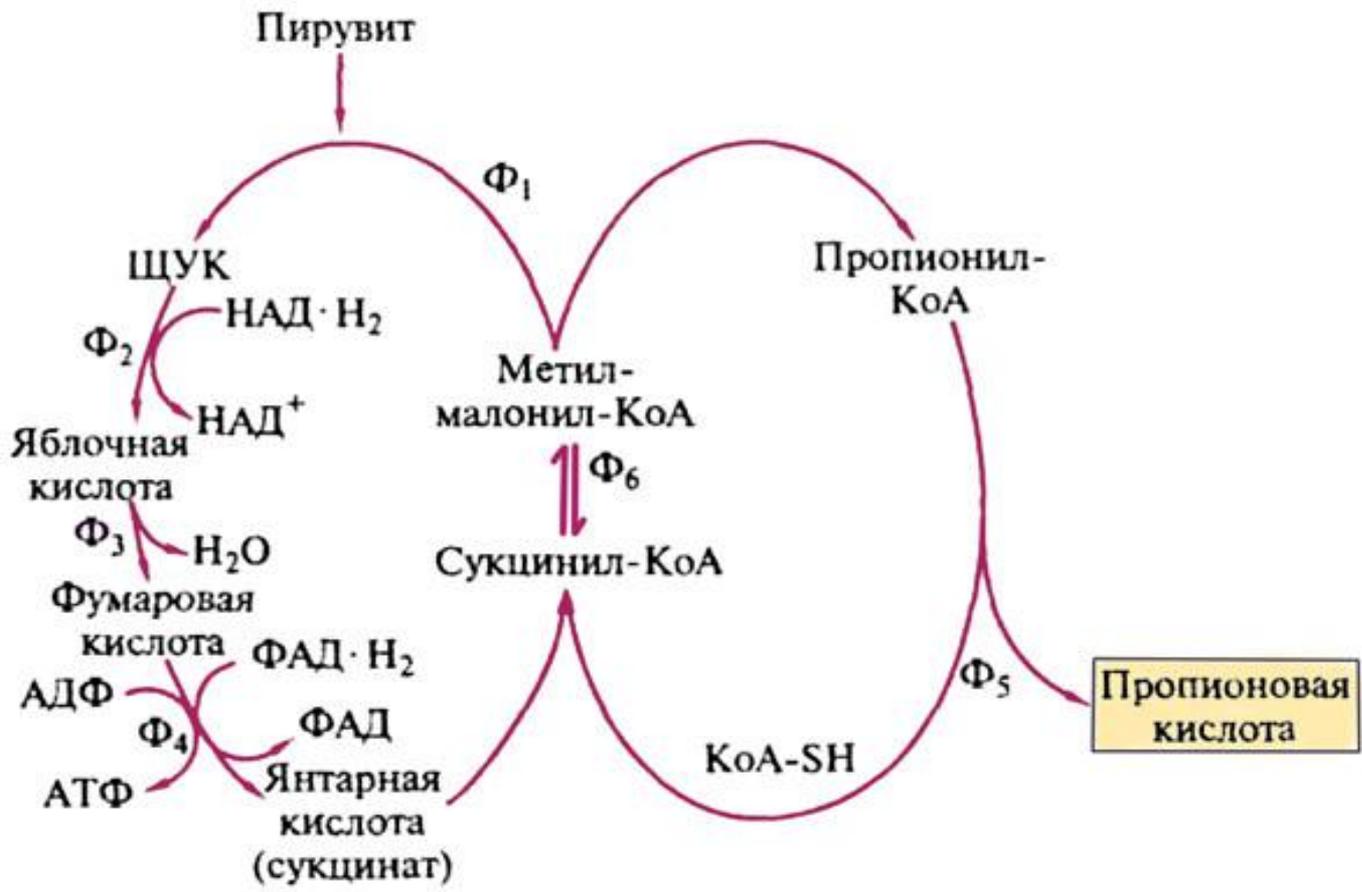
# Маслянокислое брожение



- $\Phi_1$  - пируват: ферредоксин-оксидоредуктаза
- $\Phi_2$  - ацетил-КоА- трансфераза (тиолаза)
- $\Phi_3$  - бета-оксибутирил-КоА-дегидрогеназа;
- $\Phi_4$  - кротоназа;
- $\Phi_5$  - бутирил-КоА-дегидрогеназа
- $\Phi_6$  - КоА-трансфераза
- $\Phi_7$  – фосфотрансацетилаза
- $\Phi_8$  – ацетаткиназа
- $\Phi_9$  - гидрогеназа;  $\Phi_{\text{Dox}}$  - окисленный,
- $\text{Fd}\cdot\text{H}_2$  - восстановленный ферредоксин;
- $\Phi_{\text{N}}$  - неорганический фосфат



# Пропионово-кислое брожение



$\Phi_1$  - метилмалонил-КоА-карбоксилтрансфераза;  $\Phi_2$  - малатдегидрогеназа;  $\Phi_3$  - фумараза;  $\Phi_4$  - фумаратредуктаза;  $\Phi_5$  - КоА-трансфераза;  $\Phi_6$  - метилмалонил-КоА-мутаза.