



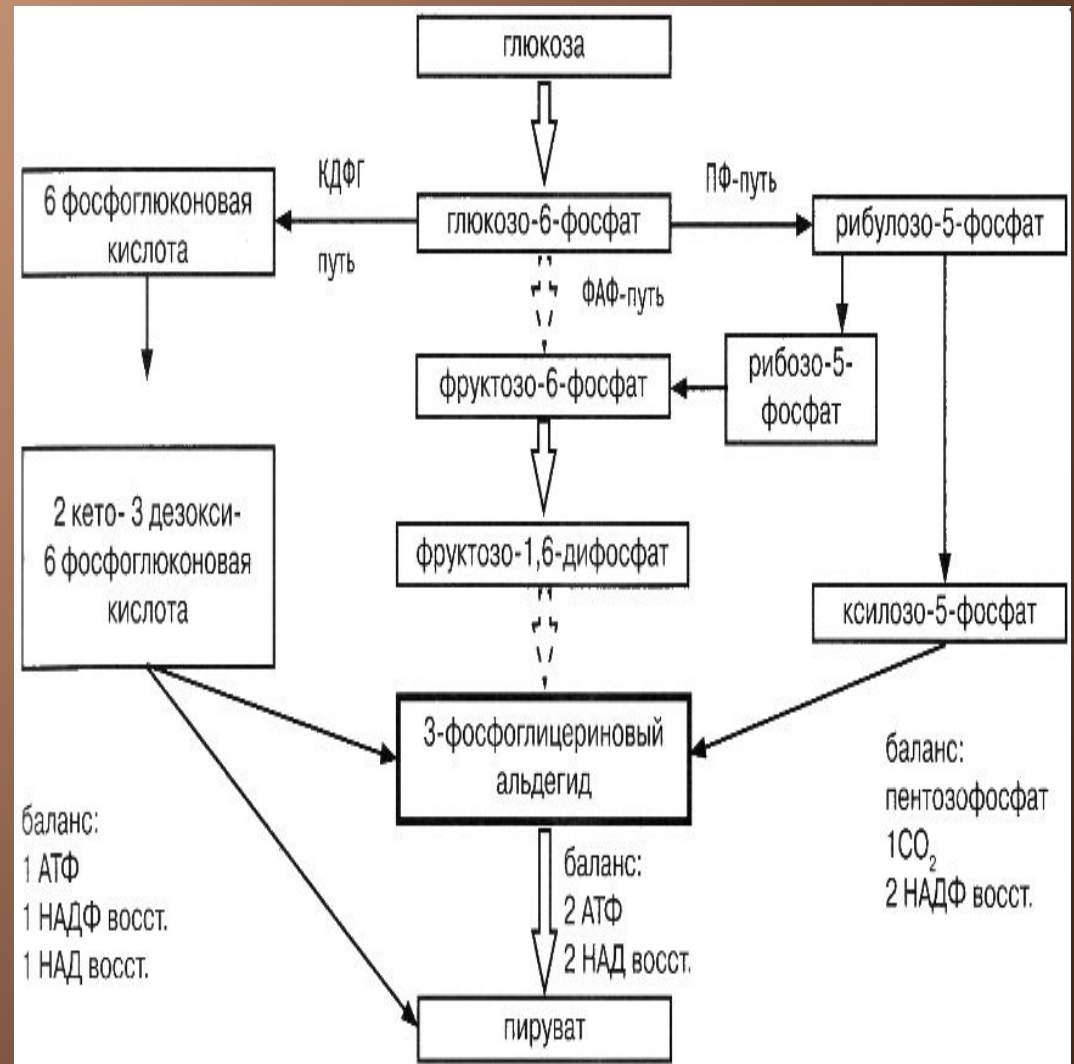
# ФИЗИОЛОГИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

Энергия в бактериальной клетке накапливается в форме молекул АТФ. У хемоорганотрофных бактерий реакции, связанные с получением энергии в форме АТФ, — это реакции окисления-восстановления, сопряженные с реакциями фосфорилирования.

При использовании в качестве источника углерода и энергии глюкозы или других гексоз начальные этапы окисления глюкозы являются общими, как при *оксидативном*, так и при *броидильном* метаболизмах. К ним относятся пути превращения глюкозы в пируват (при использовании в качестве источника энергии отличных от глюкозы гексоз, или дисахаридов, они в результате химических превращений вступают в цепь реакций, превращающих глюкозу в пируват).

# Пути расщепления глюкозы.

Расщепление глюкозы до пировиноградной кислоты, одному из важнейших промежуточных продуктов обмена веществ, у бактерий происходит 3 путями



# Пути расщепления глюкозы

- 1) через образование фруктозо-1,6-дифосфата (**ФДФ-путем**, или гликолитическим распадом, или, по имени изучавших его исследователей, путем Эмбдена—Мейергофа—Парнаса);
- 2) через пентозофосфатный путь (**ПФ-путь**);
- 3) через путь Энтнера—Дудорова, или **КДФГ-путь** (путь 2-кето-3-дезоксиглюконовой кислоты).

Глюкоза в бактериальной клетке сначала фосфорилируется при участии АТФ и фермента гексокиназы до метаболически активной формы глюкозо-6-фосфата (Г-6-Ф), которая служит исходным соединением для любого из трех указанных выше путей.

## *ФДФ-путь.*

Г-6-Ф изомеризуется до фруктозо-6-фосфата, который под действием фосфофруктокиназы превращается во фруктозо-1,6-дифосфат, который в дальнейшем через образование 3-фосфоглицеринового альдегида окисляется до пировиноградной кислоты.

Баланс окисления глюкозы по ФДФ-пути складывается из образования 2 молекул пирувата, 2 молекул АТФ и 2 молекул восстановленного НАД.



## ПФ-путь.

В этом случае глюкозо-6-фосфат через реакции дегидрирования и декарбоксилирования превращается в **рибулезо-5-фосфат** (Ри-5-Ф), который находится в равновесии с **рибозо-5-фосфатом** и **ксилулозо-5-фосфатом**. Ри-5-Ф расщепляется до **3-фосфоглицеринового альдегида**, промежуточного продукта превращения глюкозы в пируват.



Образовавшиеся **пентозофосфаты** превращаются в результате **транскетолазных** и **трансальдолазных реакций** во фруктозо-6-фосфат, замыкая реакции в цикл, и в 3-фосфоглицериновый альдегид, промежуточный продукт превращения глюкозы в пируват по ФДФ-пути.

При одном обороте цикла образуется 1 молекула 3-фосфоглицеринового альдегида, 3 молекулы  $\text{CO}_2$  и 2 молекулы восстановленного НАДФ.

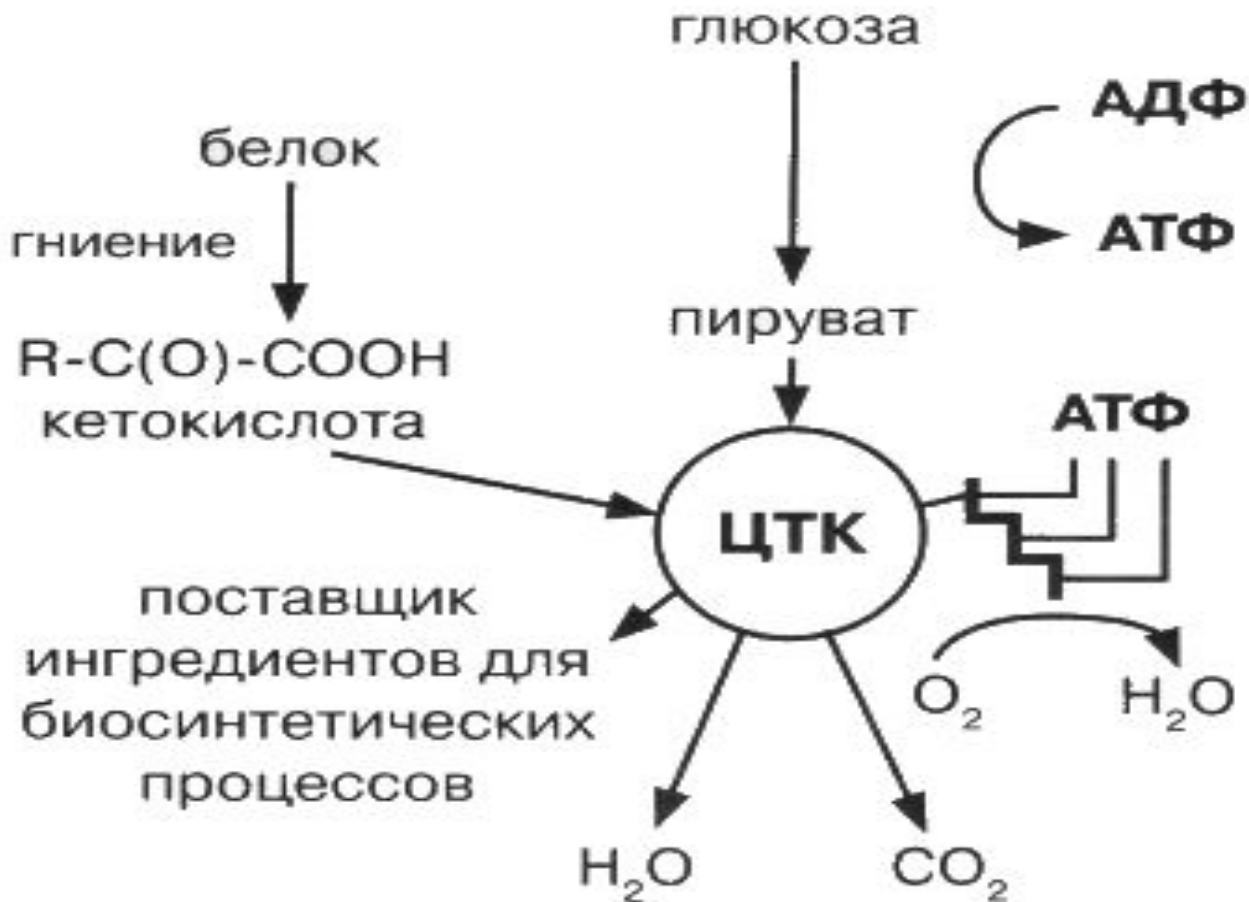
## КДФГ-путь (путь Этнера—Дудорова)

Этот путь расщепления глюкозы специфичен только для бактерий. Встречается у бактерий, потерявших фермент фосфофруктокиназу, например у бактерий рода *Pseudomonas*.

Процесс начинается с дегидрирования глюкозо-6-фосфата до 6-фосфоглюконовой кислоты. От нее под действием дегидрогеназы отщепляется вода и образуется **2-кето-3-дезокси-6-фосфоглюконовая кислота (КДФГ)**, которая расщепляется альдолазой на пируват и 3-фосфоглицериновый альдегид. Последний окисляется до пировиноградной кислоты так же, как и по **ФДФ-пути**.

На каждую молекулу ГЛЮКОЗЫ образуется 1 молекула АТФ, 1 молекула восстановленного НАД и 1 молекула восстановленного НАДФ, которая эквивалента 1 молекуле АТФ и 1 молекуле восстановленного НАД.

# Окислительный метаболизм у бактерий (дыхание)



# *Окислительный метаболизм*

Бактерии, обладающие окислительным метаболизмом, энергию получают путем *дыхания*.

*Дыхание* — процесс получения энергии в реакциях окисления-восстановления, сопряженных с реакциями окислительного фосфорилирования, при котором донорами электронов могут быть органические (у органотрофов) и неорганические (у литотрофов) соединения, а акцептором — только неорганические соединения.

В зависимости от акцепторов протонов и электронов среди бактерий различают *аэробы*, *факультативные анаэробы* и *облигатные анаэробы*. Для аэробов акцептором является кислород. Факультативные анаэробы в кислородных условиях используют процесс дыхания, в бескислородных – брожение. Для облигатных анаэробов характерно только брожение, в кислородных условиях наступает гибель микроорганизмов из-за образования перекисей, идет отравление клетки.



**Облигатные аэробы** (бруцеллы, легионеллы, псевдомонады, микобактерии, возбудитель сибирской язвы) растут и размножаются только в присутствии кислорода. Используют кислород для получения энергии путем кислородного дыхания. Они подразделяются на:

1) **строгие аэробы** (менингококки, бордетеллы), которые растут при парциальном давлении атмосферы воздуха;

2) **микроаэрофилы** (листерии) растут при пониженном парциальном давлении атмосферного воздуха.

**Облигатные анаэробы** (бифидобактерии, лактобактерии, клостридии) не используют кислород для получения энергии. Тип метаболизма у них бродильный. Они подразделяются на:

1) **строгие анаэробы** – микроорганизмы для которых молекулярный кислород токсичен; он либо убивает микроорганизмы, либо ограничивает их рост. Энергию строгие анаэробы получают маслянокислым брожением;

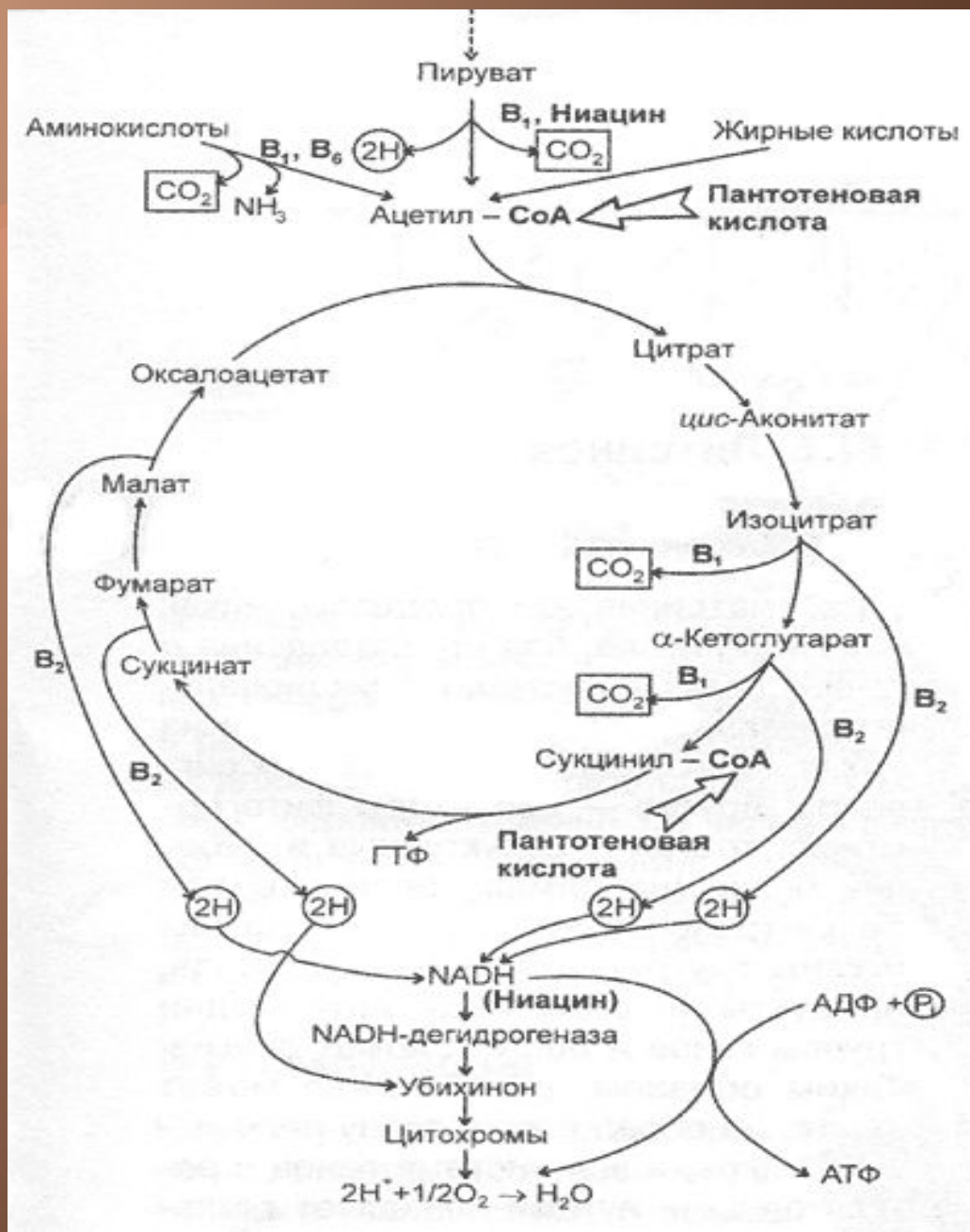
2) **аэротолерантные микроорганизмы** (молочнокислые бактерии) используют кислород для получения энергии, но могут существовать в его атмосфере. Энергию получают гетероферментативным молочнокислым брожением

**Факультативные анаэробы** (пневмококки, энтерококки, энтеробактерии, коринебактерии, франциселлы) способны расти и размножаться как в присутствии кислорода, так и в отсутствии его. Они обладают смешанным типом метаболизма. Процесс получения энергии у них может происходить кислородным дыханием в присутствии кислорода, а в его отсутствии переключаться на брожение. Различное физиологическое отношение микроорганизмов к кислороду связано с наличием у них ферментных систем, позволяющих существовать в атмосфере кислорода.

В окислительных процессах, протекающих в атмосфере кислорода образуются токсические продукты: перекись водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  и закисный радикал кислорода  $\text{O}_2^-$ . Для нейтрализации токсичных форм кислорода, микроорганизмы, способные существовать в его атмосфере, имеют защитные механизмы.

У бактерий, обладающих окислительным метаболизмом, акцептором электронов (или водорода ( $H^+$ )) является молекулярный кислород. В этом случае пируват полностью окисляется в цикле трикарбоновых кислот до  $C_2$ .

# Цикл трикарбоновых кислот (цикл Кребса)





Цикл трикарбоновых кислот выполняет функции как поставщика предшественников для биосинтетических процессов, так и атомов водорода, который в форме восстановленного НАД переносится на молекулярный кислород через серию переносчиков, обладающих сложной структурно оформленной мультиферментной системой — *дыхательной цепью*.

*Дыхательная цепь* у бактерий локализована в ЦПМ и во внутриклеточных мембранных структурах.



- ◆ Типичная цепь выглядит следующим образом:

ЦТК → НАД(Н<sub>2</sub>) → флавопротеид → хинон →  
→ цитохромы: в → с → а → О<sub>2</sub>

Среди бактериальных цитохромов различают цитохромы  $b$ ,  $c$ ,  $a$  и  $a_3$ . Конечным этапом переноса электронов (протонов) по дыхательной цепи является восстановление цитохромов  $a - a_3$  (цитохромоксидазы). Цитохромоксидаза является конечной оксидазой, передающей электроны на кислород.

Образующиеся при окислении ФАД или хинонов протоны связываются ионами  $O^{2-}$  с образованием воды.

Образование АТФ дыхательной цепи связывают с хемоосмотическим процессом. Особая ориентация переносчиков в ЦПМ приводит к тому, что передача водорода происходит с внутренней на внешнюю поверхность мембраны, в результате чего создается градиент атомов водорода, проявляющийся в наличии мембранного потенциала. Энергия мембранного потенциала используется для синтеза локализованной в мембране АТФазой АТФ.

У некоторых бактерий цитохромы отсутствуют, и при контакте с кислородом происходит непосредственный перенос водорода на кислород с помощью флавопротеидов, конечным продуктом при этом оказывается перекись водорода —  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

- ◆ Помимо углеводов прокариоты способны использовать другие органические соединения, в частности белки, в качестве источника энергии, окисляя их полностью до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

- ◆ **Аминокислоты** могут использоваться в конструктивном метаболизме, а могут у аммонифицирующих бактерий служить основным материалом в энергетических процессах при *окислительном дезаминировании*, в результате которого происходит выделение аммиака и превращение аминокислоты в кетокислоту, которая через цикл трикарбоновых кислот вступает в конструктивный метаболизм:

