

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Оренбургский государственный университет»**

Автор: О.П. Кушнарера



# Аэробное дыхание Цикл Кребса

## **План:**

1. Общая характеристика процесса дыхания.
2. Виды брожения.
3. Окислительное декарбоксилирование ПВК.
4. Цикл Кребса – сущность, регуляция, значение.

# Дыхание

Окислительно-восстановительный процесс расщепления (ассимиляции) сложных органических соединений (углеводов, липидов) с выделением энергии. При окислении высвобождается та энергия, которая была аккумулирована растениями в процессе фотосинтеза.

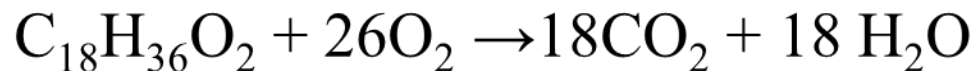


■ **Дыхательный коэффициент** – это отношение объема выделенного углекислого газа к объему поглощенного кислорода. Его величина позволяет судить о природе субстрата дыхания.

1) Субстрат дыхания углеводы - ДК = 1

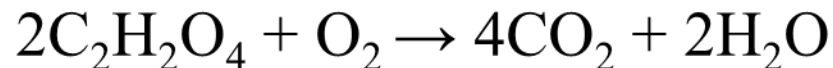
$$\text{ДК} = \frac{V(\text{CO}_2)}{V(\text{O}_2)} = \frac{6}{6} = 1$$

2) Субстрат дыхания жиры – ДК < 1



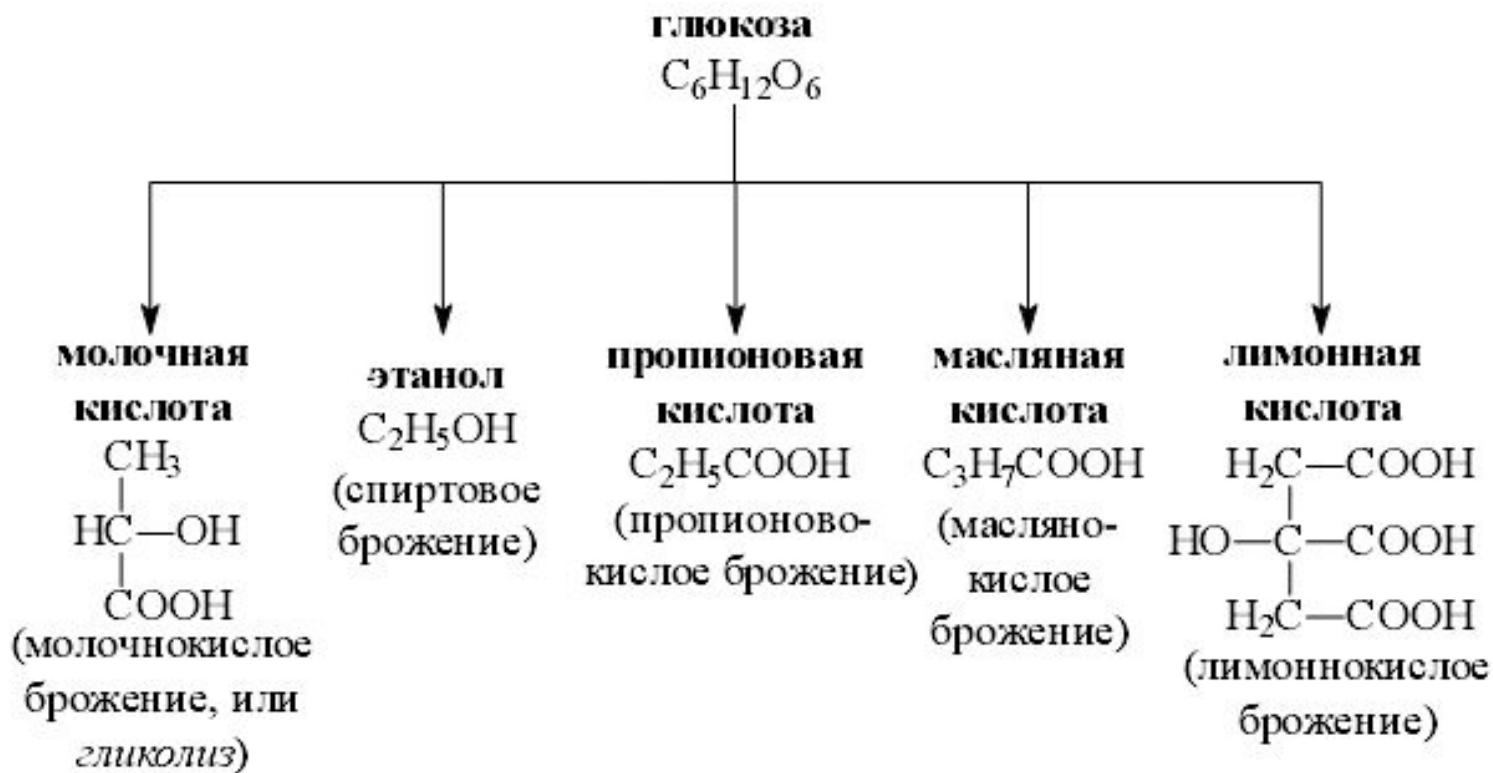
$$\text{ДК} = \frac{V(\text{CO}_2)}{V(\text{O}_2)} = \frac{18}{26} = 0,69$$

3) Субстрат дыхания – органические кислоты – ДК > 1

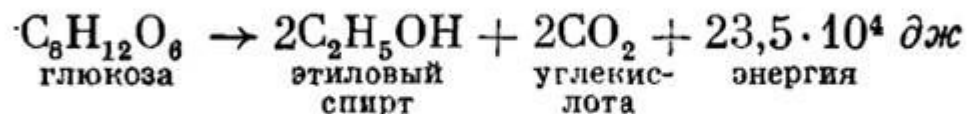


$$\text{ДК} = \frac{V(\text{CO}_2)}{V(\text{O}_2)} = \frac{4}{1} = 4$$

**Брожение** - ферментативный энергообразующий окислительно-восстановительный процесс, протекающий без участия молекулярного кислорода. Возбудителями брожения являются микроорганизмы.

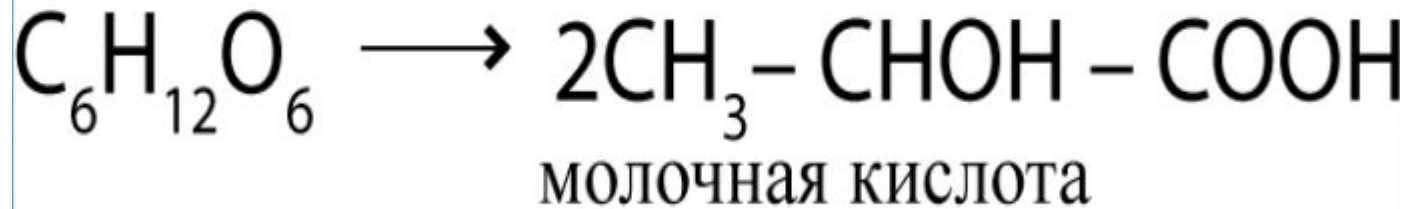


# Спиртовое брожение



Возбудители – дрожжи. Процесс спиртового брожения лежит в основе виноделия, пивоварения, хлебопечения, производства этилового спирта и глицерина. Совместно с молочно-кислым брожением оно используется при получении некоторых кисло-молочных продуктов (кумыса, кефира).

## Молочнокислое брожение



Типы молочнокислого брожения:

1. Гомоферментативное - в процессе молочнокислого брожения образуется только молочная кислота.

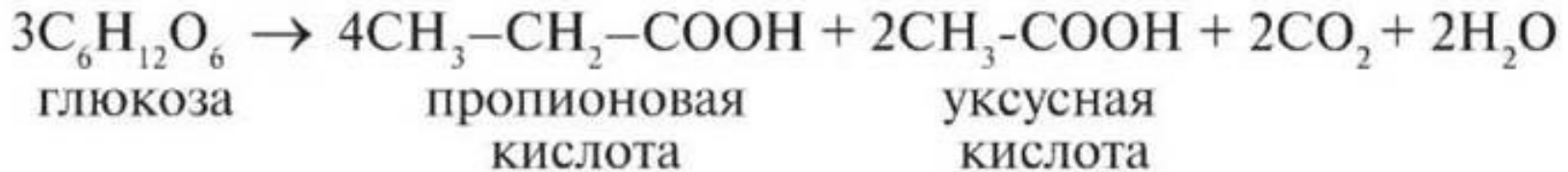
2. Гетероферментативное – в процессе молочнокислого брожения наряду с молочной кислотой образуются еще и другие продукты (уксусная кислота, этиловый спирт, углекислый газ и др.).

Возбудители – молочнокислые бактерии.

Используют в производстве кисломолочных продуктов, квашении капусты, силосовании кормов.



**Пропионовокислое брожение** – используют при производстве сыров. Возбудители пропионовокислые бактерии .



**Маслянокислое брожение** – не имеет практического применения. Возбудители – маслянокислые бактерии.



Рассчитайте теоретический выход этанола при спиртовом брожении; выход лактата при гомоферментативном молочнокислом брожении, если в среде находилось 100 г глюкозы.

Ответ:

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 51,2 \text{ г.}$$

$$m(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 100,8 \text{ г.}$$

## **АЭРОБНОЕ ОКИСЛЕНИЕ УГЛЕВОДОВ**

**Аэробное окисление глюкозы – это многостадийный процесс распада ее молекулы до конечных продуктов обмена до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с образованием 38 молекул АТФ и выделением тепловой энергии.**

Протекает оно при участии  $\text{O}_2$ , который доставляется в ткани с участием белка гемоглобина.

Этот процесс окисления углеводов – один из главных механизмов образования АТФ в тканях организма. Он включает такие основные стадии:

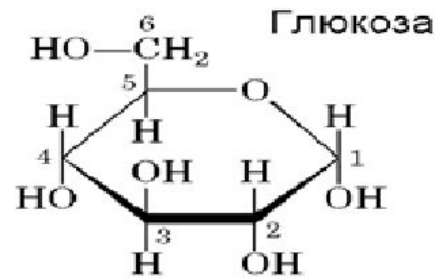
- 1. Гликолитический распад молекулы глюкозы до двух молекул пировиноградной кислоты (ПВК).**
- 2. Превращение ПВК в ацетил-КоА.**
- 3. Окисление ацетил-КоА в цикле лимонной кислоты и на дыхательной цепи.**

Процесс распада молекулы глюкозы до ПВК протекает одинаково в анаэробных и аэробных условиях.

Образовавшаяся в гликолитической стадии ПВК подвергается далее окислительному декарбоксилированию, в результате чего образуются макроэргическое вещество ацетил-КоА, восстановленная форма НАДН<sub>2</sub> и одна молекула  $\text{CO}_2$ .

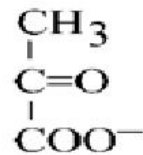
Если в процессе гликолиза образовалась молочная кислота, то в аэробных условиях она превращается в ПВК. Превращения ПВК – окислительное декарбоксилирование.

Ацетил-КоА далее включается в цикл лимонной кислоты, где расщепляется до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Вода образуется на системе дыхательных ферментов при взаимодействии водорода, образовавшегося в реакциях биологического окисления, с атомарным кислородом вдыхаемого воздуха.



Гликолиз  
(10 реакций)

**1 этап - гликолиз**



Пируват



Аэробные условия

**2 этап - окислительное  
декарбоксилирование  
пирувата (ОДП)**

Ацетил-СоА



**3 этап - ЦТК**

# Окислительное декарбоксилирование пирувата

Внутриклеточная локализация – МАТРИКС МИТОХОНДРИЙ



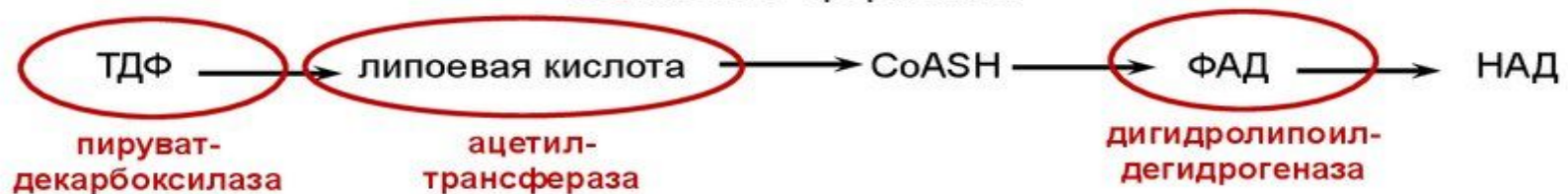
Работает сложноорганизованный комплекс ферментов и кофакторов –  
**ПИРУВАТДЕГИДРОГЕНАЗНЫЙ КОМПЛЕКС**

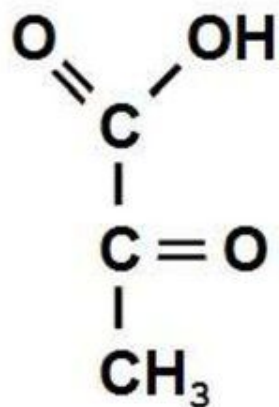
# Пируватдегидрогеназный комплекс

Состав и функции компонентов пируватдегидрогеназного комплекса

Кофермент	Активной формой какого витамина является	Функция
ТДФ (тиаминдифосфат)	$B_1$	Декарбоксилирование пирувата
Амид липоевой кислоты	N	Перенос ацетильного остатка
CoASH	$B_3$	1. Акцептор ацетильного остатка 2. Донор атома водорода
НАД	PP ( $B_5$ )	Дегидрирование ФАДН <sub>2</sub>
ФАД	$B_2$	Дегидрирование восстановленной формы липоевой кислоты

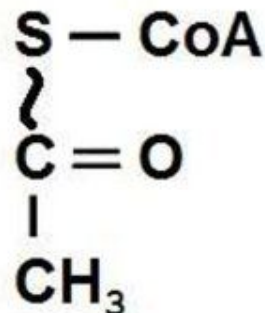
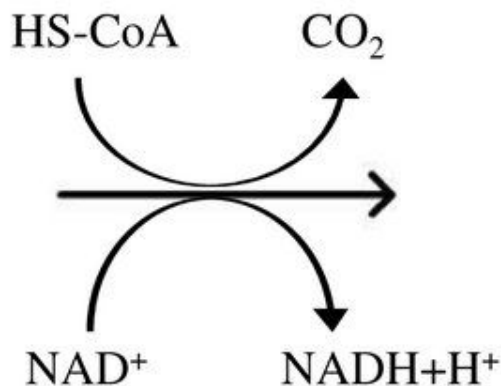
Порядок включения коферментов в реакцию и сформированные за счёт них устойчивые комплексы - ферменты:





Пируват

Пируватдегидрогеназный  
комплекс



Ацетил-КоА

Итоги ОДП:

- образование ацетил-КоА – важнейшего метаболита в клетке;
- образование 1 НАДН<sub>2</sub> (на 1 моль глюкозы – 2 НАДН<sub>2</sub>), который поступает в ЭТЦ;
- окисление одного атома углерода до СО<sub>2</sub>;
- обеспечивает вхождение ПВК в цикл Кребса.

# Цикл Кребса (ЦТК, цикл лимонной кислоты)

Универсальный путь окисления органических веществ в отличие от гликолиза.

Протекает в матриксе митохондрий; ферменты, за исключением одного, не связаны с мембранами.

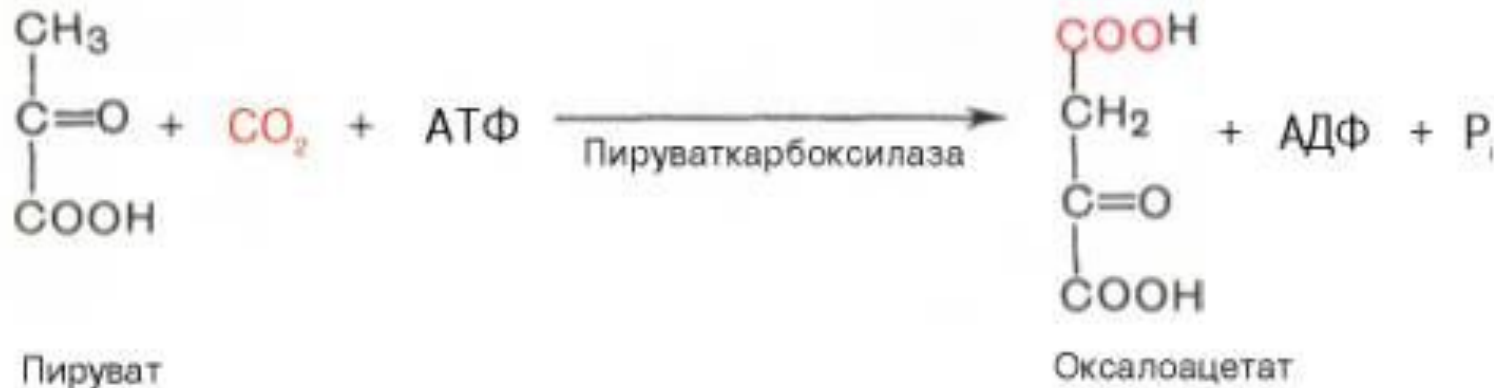
Состоит из 8 реакций.



**КРЕБС**  
Ханс Адольф  
1900-1981

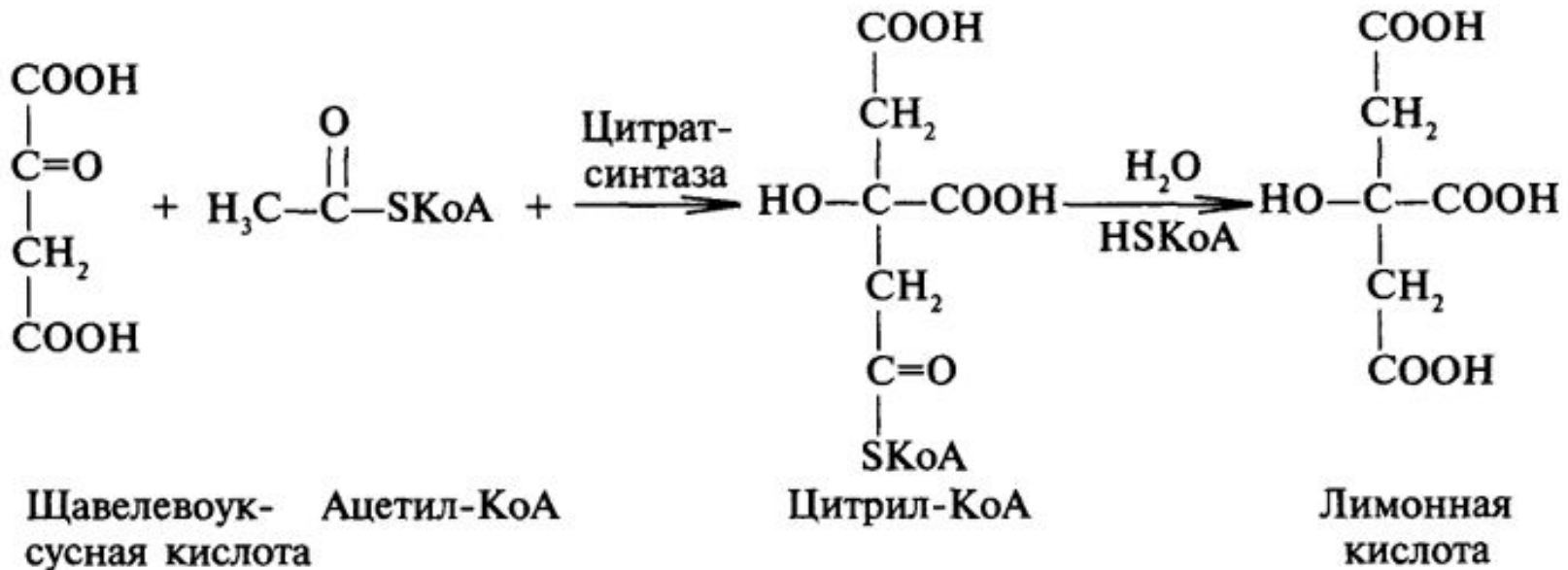


## Синтез щавелево-уксусной кислоты

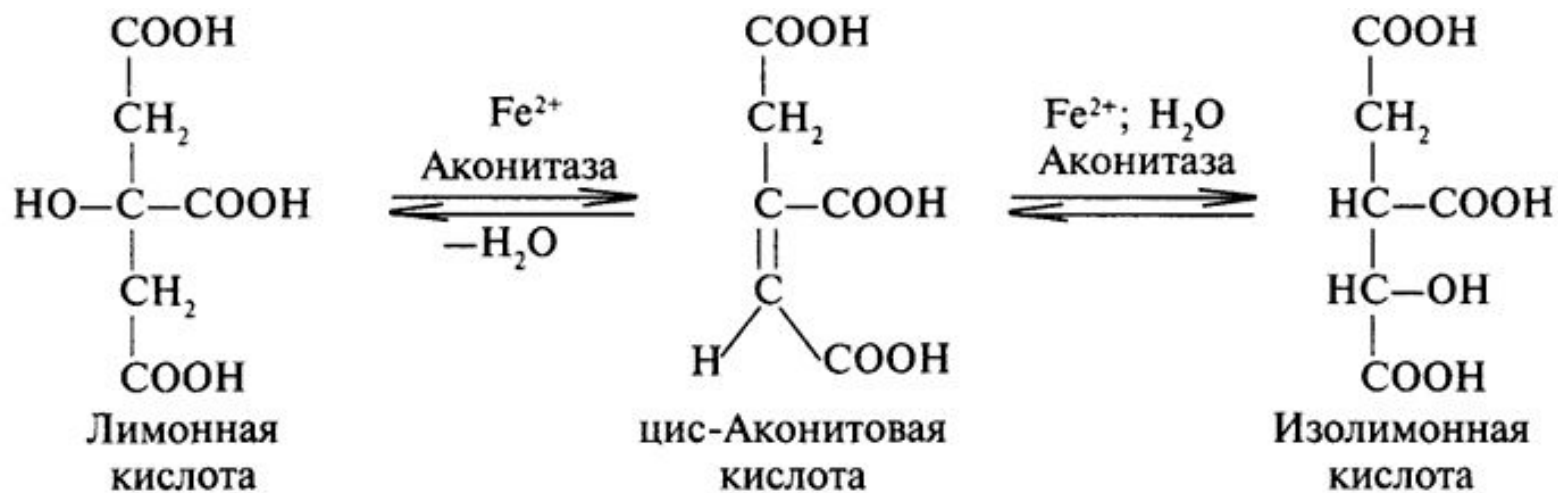


Карбоксилирование ПВК однократно происходит в митохондриях. Эта реакция не включается в цикл Кребса, это подготовительная, предварительная реакция. Далее ЩУК образуется по ходу цикла.

1. **Синтез лимонной кислоты** - конденсация ацетил-КоА и щавелевоуксусной кислоты с участием фермента цитратсинтазы митохондриального матрикса.



2. **Образование изолимонной кислоты** – проходит с участием аконитагидратазы через стадию образования цис-аконитовой кислоты.

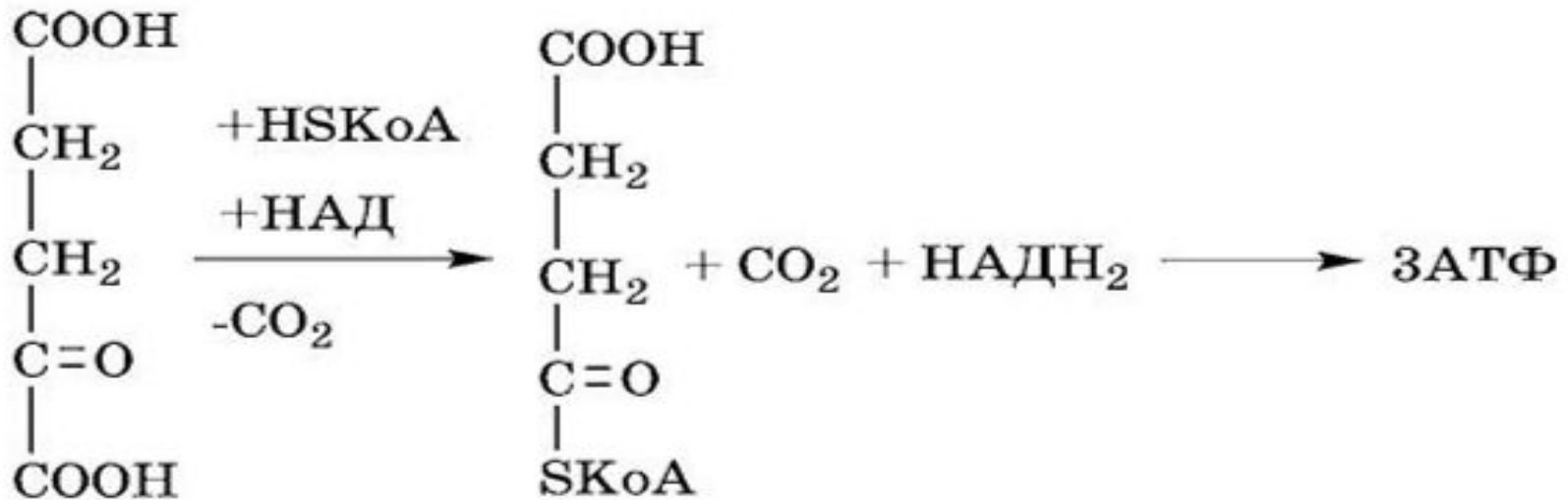


3. Окисление изолимонной кислоты – с участием изоцитратдегидрогеназы образуется  $\alpha$ -кетоглутаровая кислота, одновременно выделяется 1 моль  $\text{CO}_2$  и 1  $\text{НАДН}_2$



#### 4. Окислительное декарбоксилирование $\alpha$ -кетоглу-таровой кислоты.

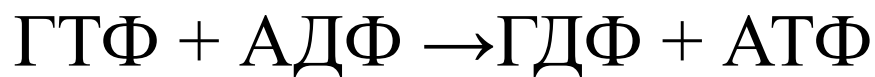
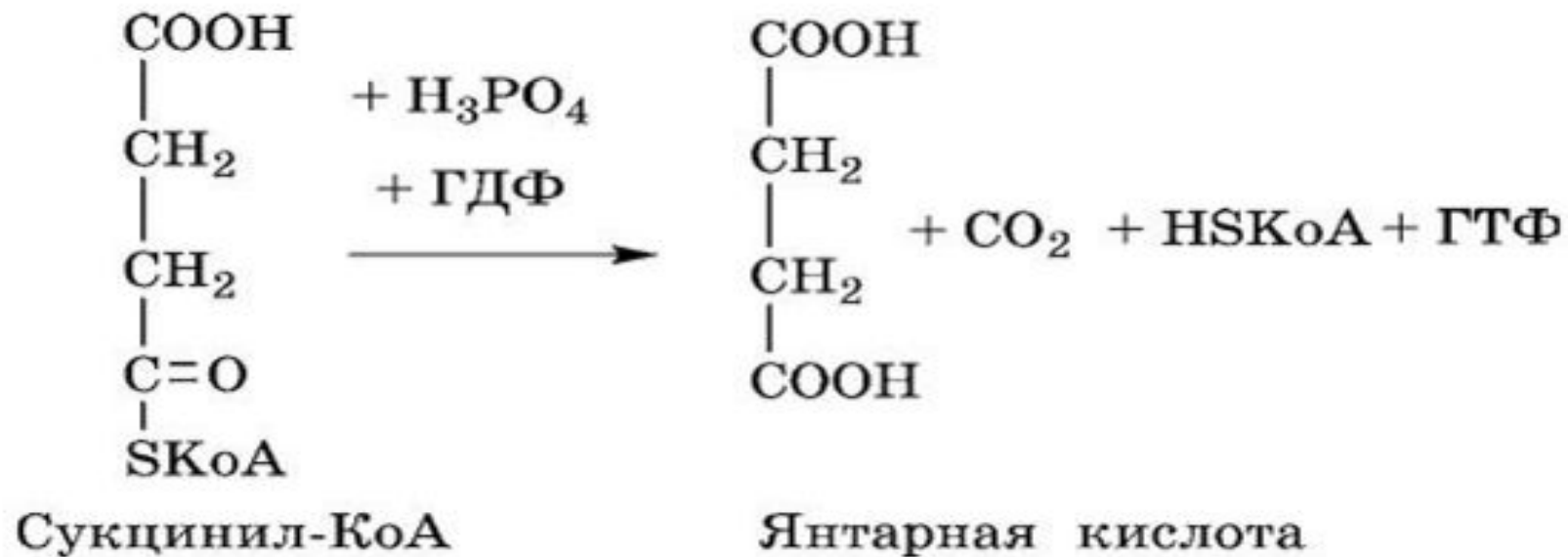
Комплекс  $\alpha$  –кетоглутаратдегидрогеназа аналогичен по составу и действию пируватдегидрогеназному комплексу.



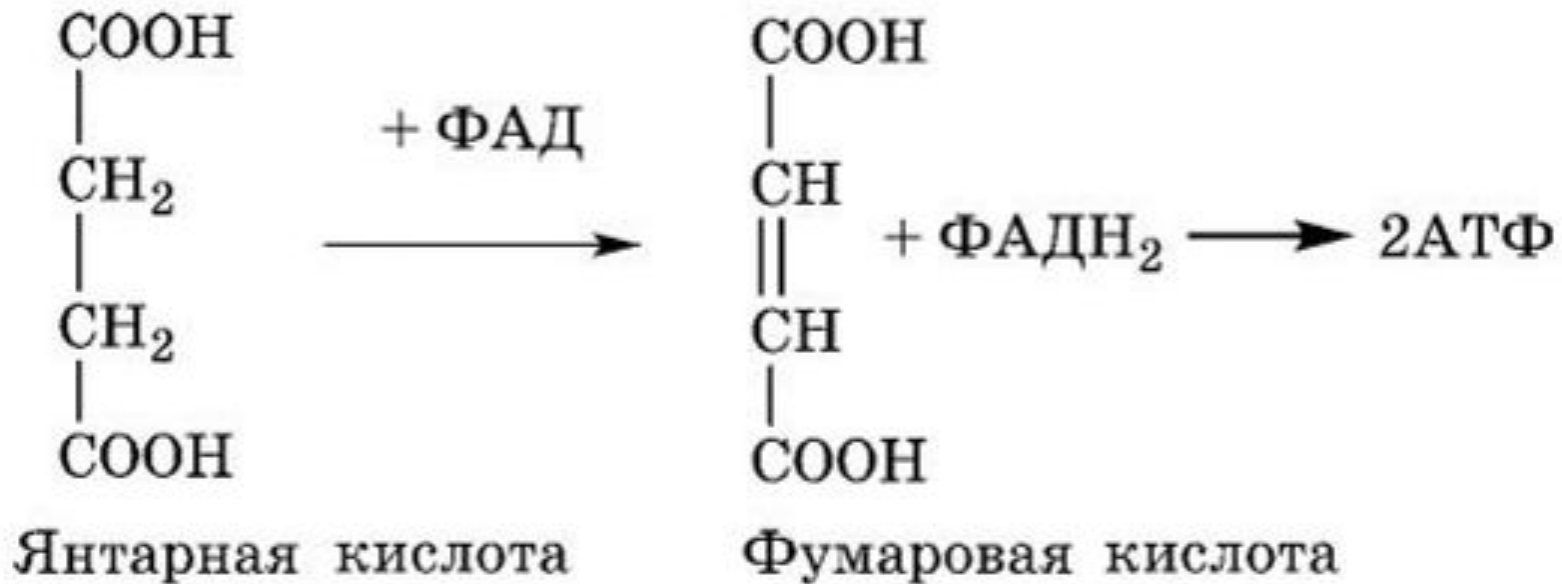
$\alpha$ -Кетоглутаровая  
кислота

Сукцинил-КоА

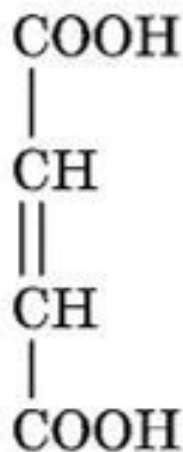
5. **Образование янтарной кислоты** - молекула сукцинил-КоА имеет макроэргическую связь, энергия которой сохраняется в форме ГТФ. Фермент сукцинил-КоА-синтетаза; ГТФ далее превращается в АТФ.



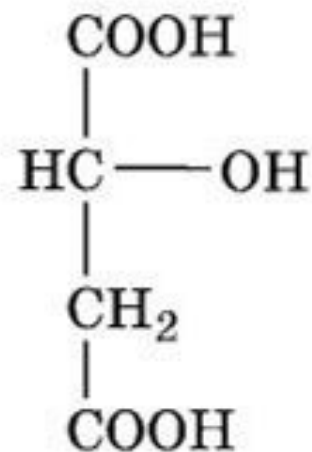
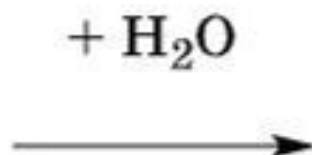
6. **Образование фумаровой кислоты** – фермент сукцинатдегидрогеназа (ФАД-зависимый) окисляет янтарную кислоту.



7. Гидратация фумаровой кислоты происходит при участии фумаратгидратазы; образуется яблочная кислота (малат).



Фумаровая кислота



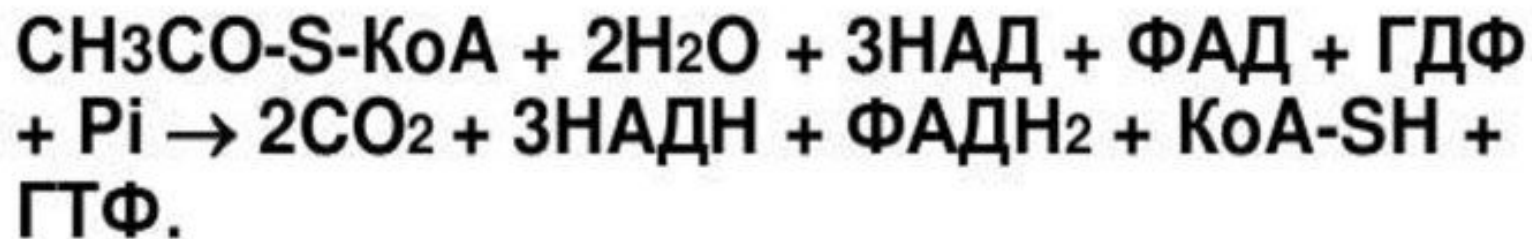
Яблочная кислота



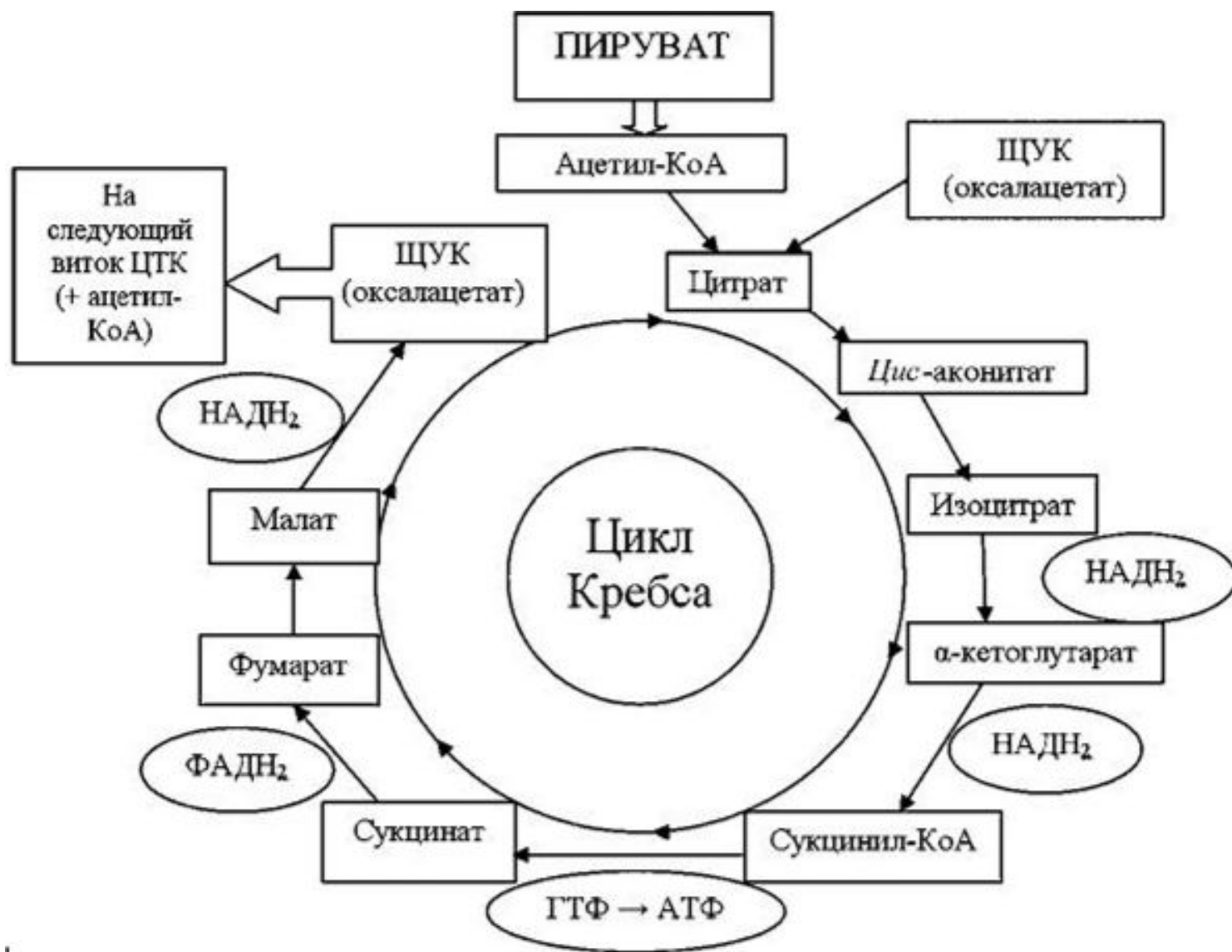
8. Окисление яблочной кислоты ферментом малатдегидрогеназой (НАД-зависимый) до ЩУК (оксалоацетат).



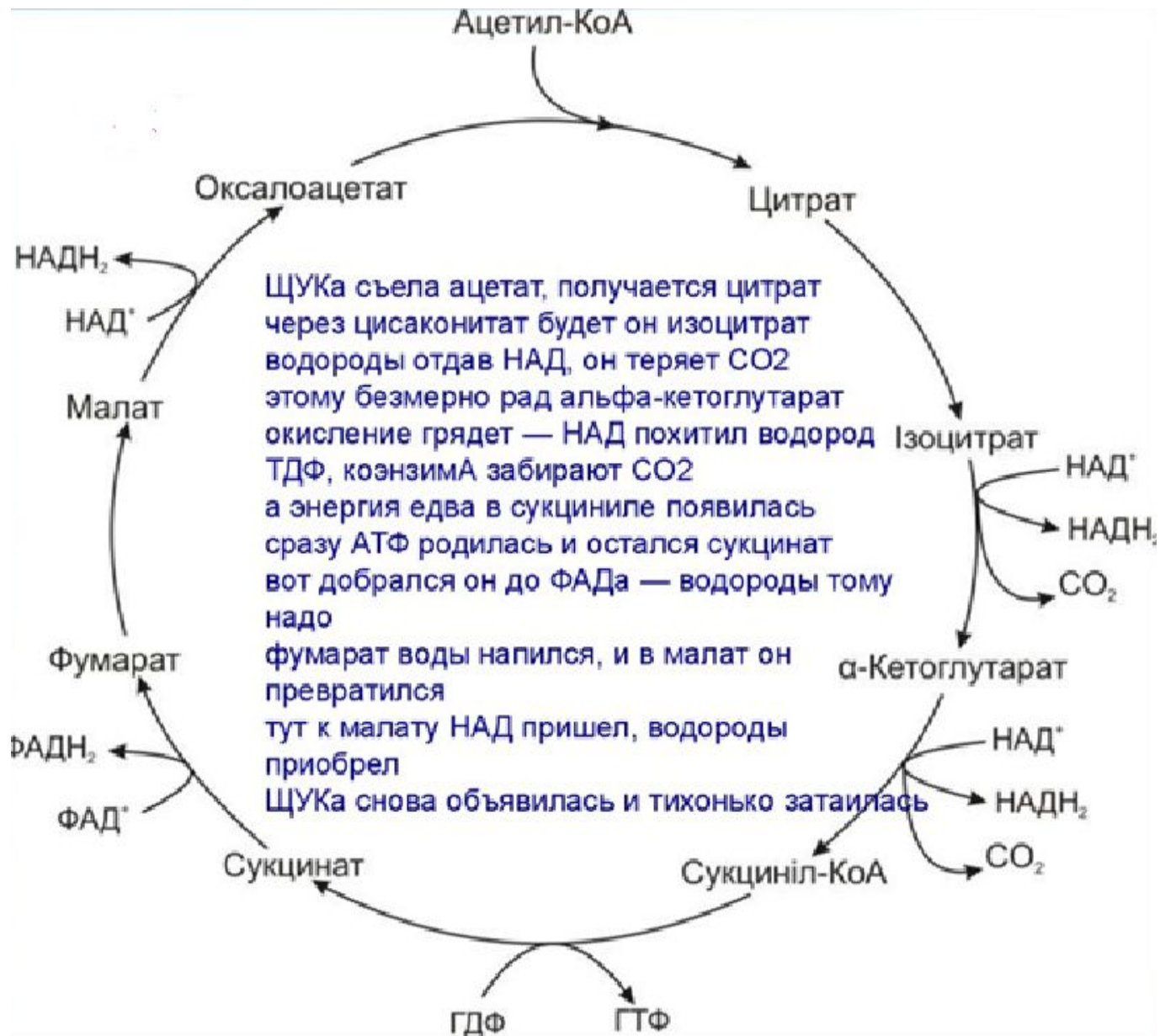
Суммарное уравнение подводящее итоги работы цикла:



Реакции в цикле протекают только в одном направлении, так как величина свободной энергии в суммарном итоге отрицательная ( $G' = -40$  кДж·моль).



Цикл трикарбоновых кислот в виде схемы



## Энергетика цикла Кребса

3, 4, 8 реакции	3 НАДН <sub>2</sub>
6 реакция	1 ФАДН <sub>2</sub>
5 реакция	1 АТФ

$$1 \text{ НАДН}_2 = 3 \text{ АТФ} \quad 3 \cdot 3 = 9 \text{ АТФ}$$

$$1 \text{ ФАДН}_2 = 2 \text{ АТФ} \quad 2 \cdot 1 = 2 \text{ АТФ}$$

$$\text{итого: } 9 + 2 + 1 = 12 \text{ АТФ,}$$

Т.к. из глюкозы получилось два остатка ацетил-КоА, полученное количество АТФ удваиваем:

$$2 \cdot 12 = 24 \text{ АТФ}$$

– это результат окисления 2 молекул ацетил-Ко-А.

■ Все этапы аэробного окисления углеводов:

Гликолиз – 8 АТФ

ОДП – 6 АТФ

ЦТК – 24 АТФ

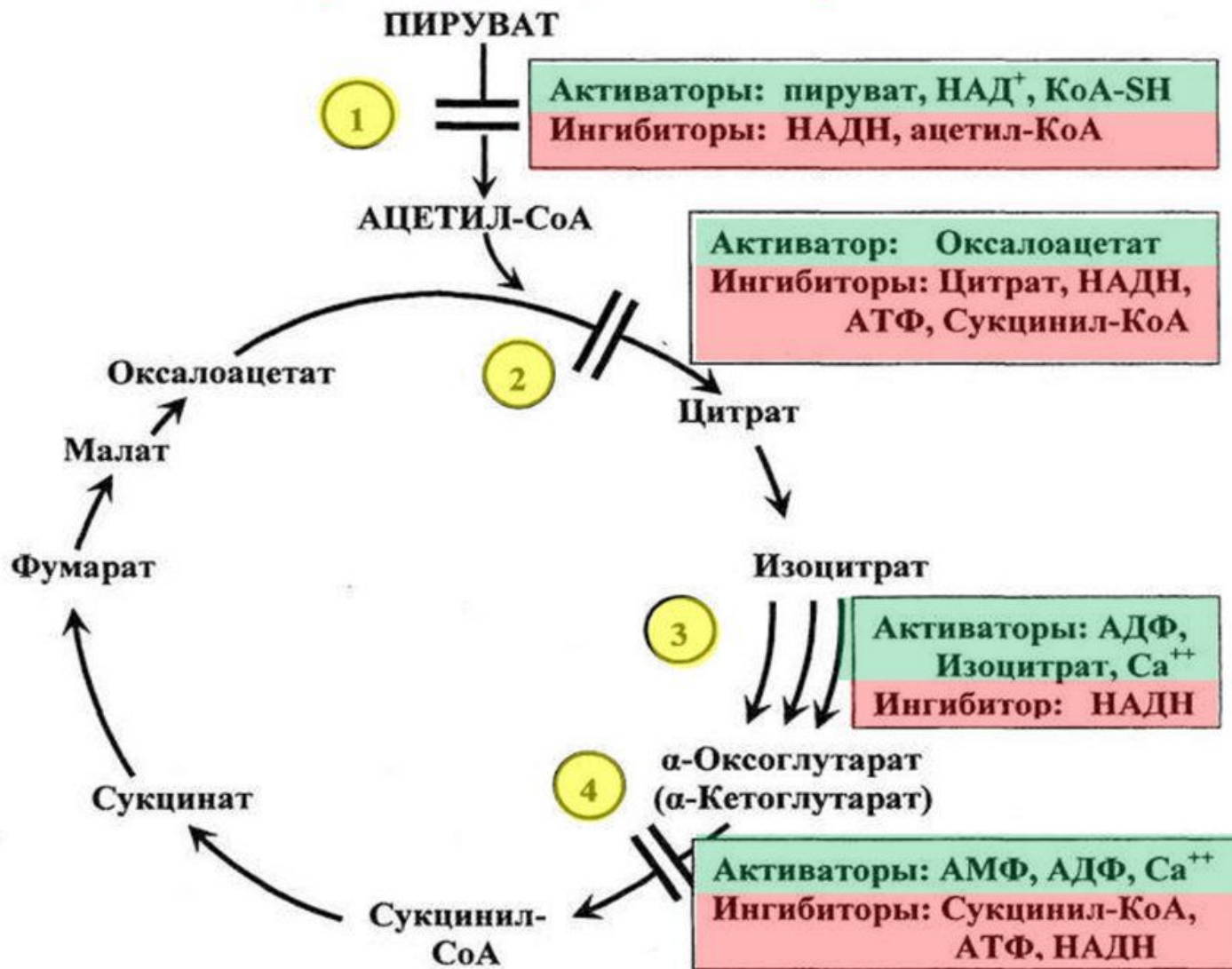
ВСЕГО: 38 АТФ

$38 \cdot 40 \text{ кДж} = 1520 \text{ кДж}$

$$\text{КПД} = \frac{1520}{2780} \cdot 100\% \approx 55\%$$

КПД большинства двигателей внутреннего сгорания не превышает 40%.

# Регуляция цикла Кребса



## Значение цикла Кребса

Цикл Кребса - центральный метаболический путь углерода практически всех организмов на Земле. Он является ключевым звеном как катаболических, так и анаболических процессов.

Продукты распада жиров, белков и других веществ поступают из цитоплазмы, превращаются в ацетил-КоА и также вовлекаются в цикл Кребса.

Промежуточные продукты цикла Кребса могут выходить из цикла на разных стадиях и использоваться в качестве предшественников в биосинтезе самых различных соединений, т. е. включаться в анаболический процесс.

Энергия, образующаяся при окислении ацетил-КоА используется клеткой для осуществления различных процессов.