Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби

Факультет Химии и Химической Технологии

Лекция 10

Гликолиз глюкозы.

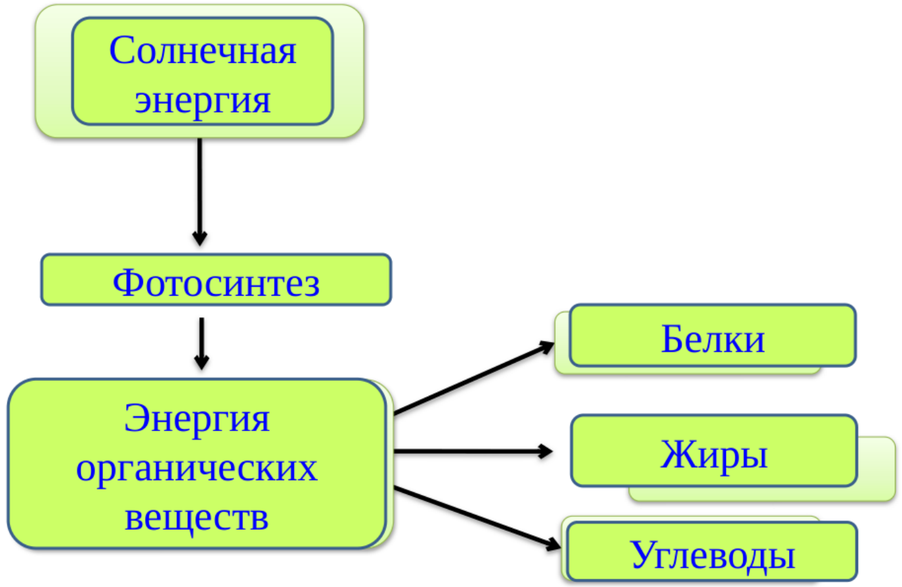
Цель: Изучить основные пути обмена углеводов в организме, процессы синтеза и распада гликогена, этапы аэробного и анаэробного гликолиза, их энергетический баланс, а также особенности пентозофосфатного пути и глюконеогенеза.

К.х.н., ассоциированный профессор Литвиненко Ю.А.



Алматы, 2026г.

Источник энергии на Земле является Солнце



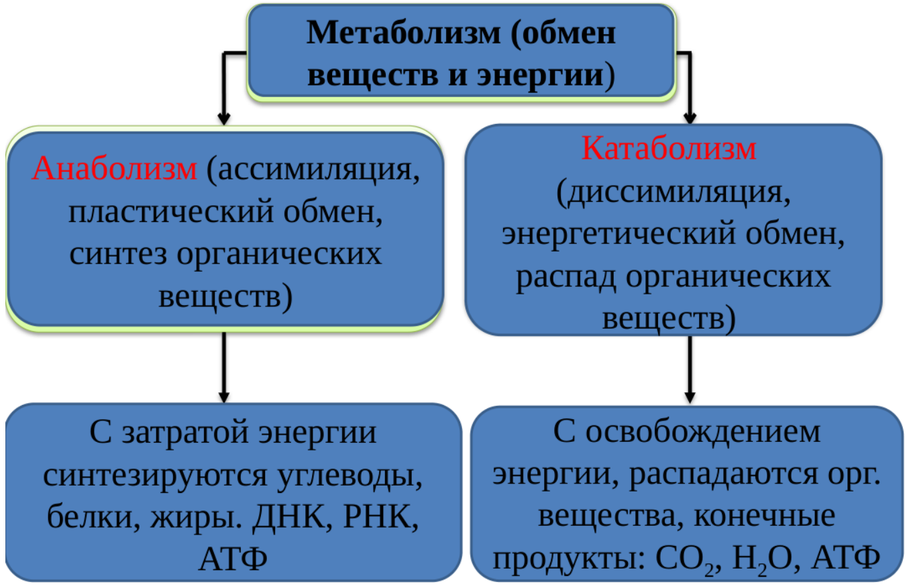
ОБМЕН ВЕЩЕСТВ

Обмен веществ (метаболизм) – это совокупность всех химических реакций, которые происходят в организме.

Пластический обмен (анаболизм, ассимиляция, биосинтез) – это когда из простых веществ с затратой энергии образуются синтезируются) более сложные.
Примеры: фотосинтез, синтез белка.

Энергетический обмен (катаболизм, диссимиляция, распад) – это когда сложные вещества распадаются (окисляются) до более простых, и при этом выделяется энергия, необходимая для жизнедеятельности организма.
Примеры: гликолиз, переваривание пищи.

Метаболизм

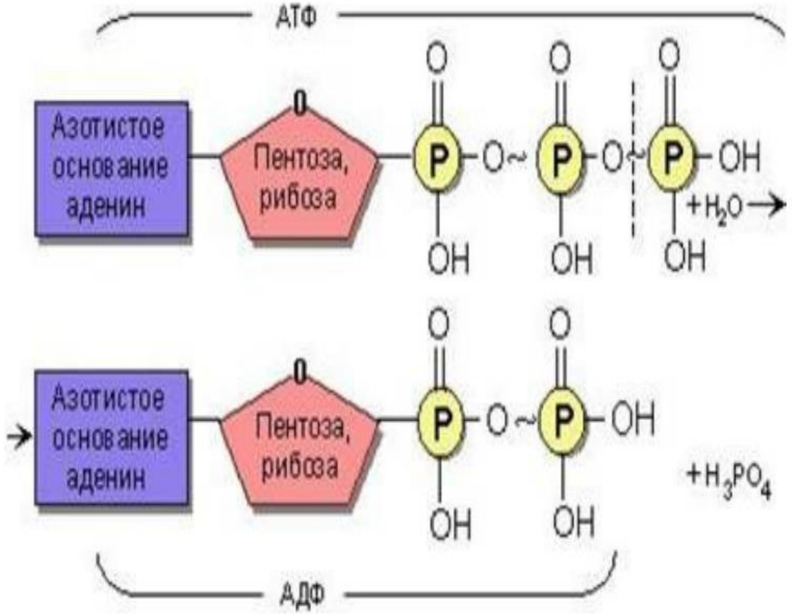


АТФ: строение, гидролиз и механизмы синтеза

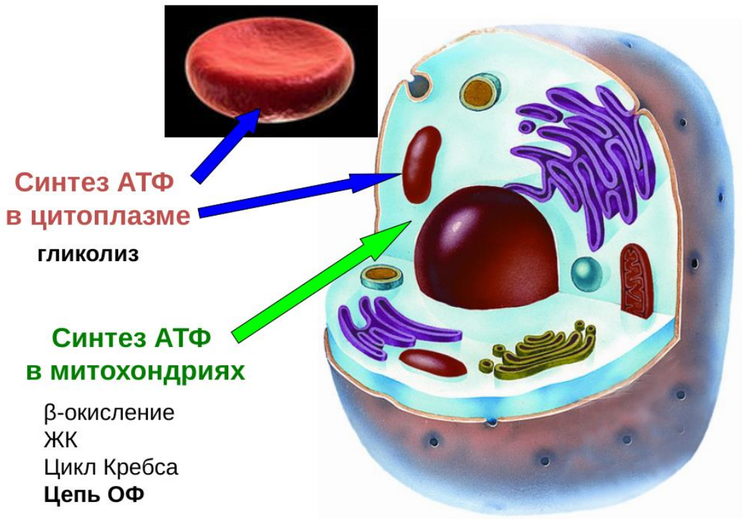
АТФ (аденозинтрифосфорная кислота) - универсальный поставщик энергии в клетках всех живых организмов.

$АТФ + H_2O \rightarrow АДФ + H_3PO_4 + 40\ кДж$

$АДФ + H_2O \rightarrow АМФ + H_3PO_4 + 40\ кДж$



Синтез АТФ



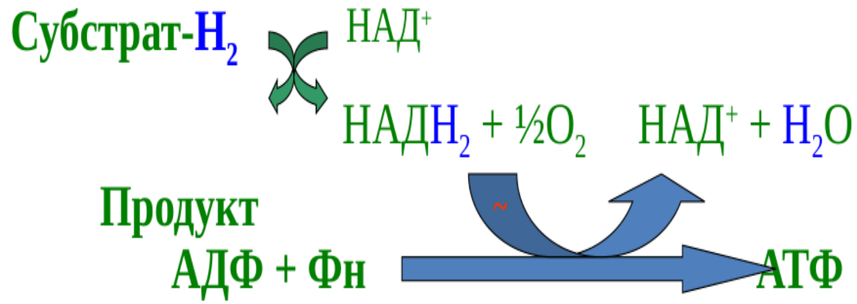
Механизмы синтеза АТФ

1. Субстратное фосфорилирование



Энергия химической связи

2. Окислительное фосфорилирование



Этапы обмена веществ и энергетического обмена

ЭТАПЫ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВ

•1 этап – переваривание. Это механическое и ферментативное расщепление сложных веществ, которое происходит в ЖКТ под действием соответствующих гидролаз;
•2 этап – всасывание – это транспорт продуктов распада из просвета кишечника во внутреннюю среду организма. Всасывание осуществляется через мембраны микроворсинок тонкого кишечника и бывает активным и пассивным.
•3 этап – промежуточный обмен – это превращение в клетках или тканях организма всосавшихся веществ;
•4 этап – выделение конечных продуктов обмена.



Процессы происходящие на 1 этапе

- Расщепление полимеров до мономеров.
- В пищеварительной системе крупные молекулы пищи распадаются:

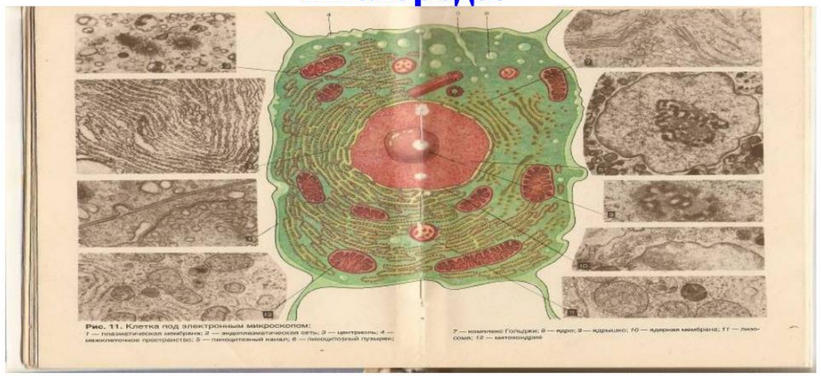
Полисахариды → глюкоза
Белки → аминокислоты
Жиры → глицерин и жирные кислоты.

- Энергия рассеивается в виде тепла (АТФ не образуется). Мономеры всасываются в кровь и доставляются к клеткам.

Бескислородный и кислородный этапы

2 ЭТАП – бескислородный, неполное окисление, анаэробное дыхание – гликолиз, брожение.

Происходит в цитоплазме клеток, без кислорода.



Гликолиз

Гликолиз – процесс расщепления углеводов в отсутствии кислорода под действием ферментов.	
Где происходит?	В клетках животных (митохондриях)
Что происходит?	Глюкоза с помощью ферментативных реакций окисляется

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_3PO_4 + 2АДФ \rightarrow 2C_3H_4O_3 + \underline{2АТФ} + 2H_2O$$

глюкоза *фосфорная кислота* *ПВК* *вода*

Итого: энергия в виде 2 молекул АТФ .

3 ЭТАП – кислородный, полное окисление, аэробное дыхание

Что происходит?	Дальнейшее окисление продуктов гликолиза до CO_2 и H_2O с помощью окислителя O_2 и ферментов и дает много энергии в виде АТФ.
Где происходит?	Осуществляется в митохондриях, связан с матриксом митохондрий и ее внутренними мембранами.

$$2C_3H_6O_3 + 6O_2 + 36АДФ + 36H_3PO_4 \rightarrow 6CO_2 + 42H_2O + \underline{36АТФ}$$

Спиртовое и молочнокислое брожение

Молочно-кислое брожение

Где происходит?	В клетках человека животных, в некоторых видах бактерий и грибов
Что образуется?	При недостатке кислорода – молочная кислота. Лежит в основе приготовления кислого молока, простокваши, кефира и др. молочнокислых продуктов питания.

ИТОГО: 40% энергии запасается в АТФ, 60% рассеивается в виде тепла в окружающую среду.

Спиртовое брожение

Где происходит?	В растительных и некоторых дрожжевых клетках вместо гликолиза
Что происходит и образуется?	На спиртовом брожениииосновано приготовление вина, пива, кваса. Тесто, замешанное на дрожжах, даёт пористый, вкусный хлеб

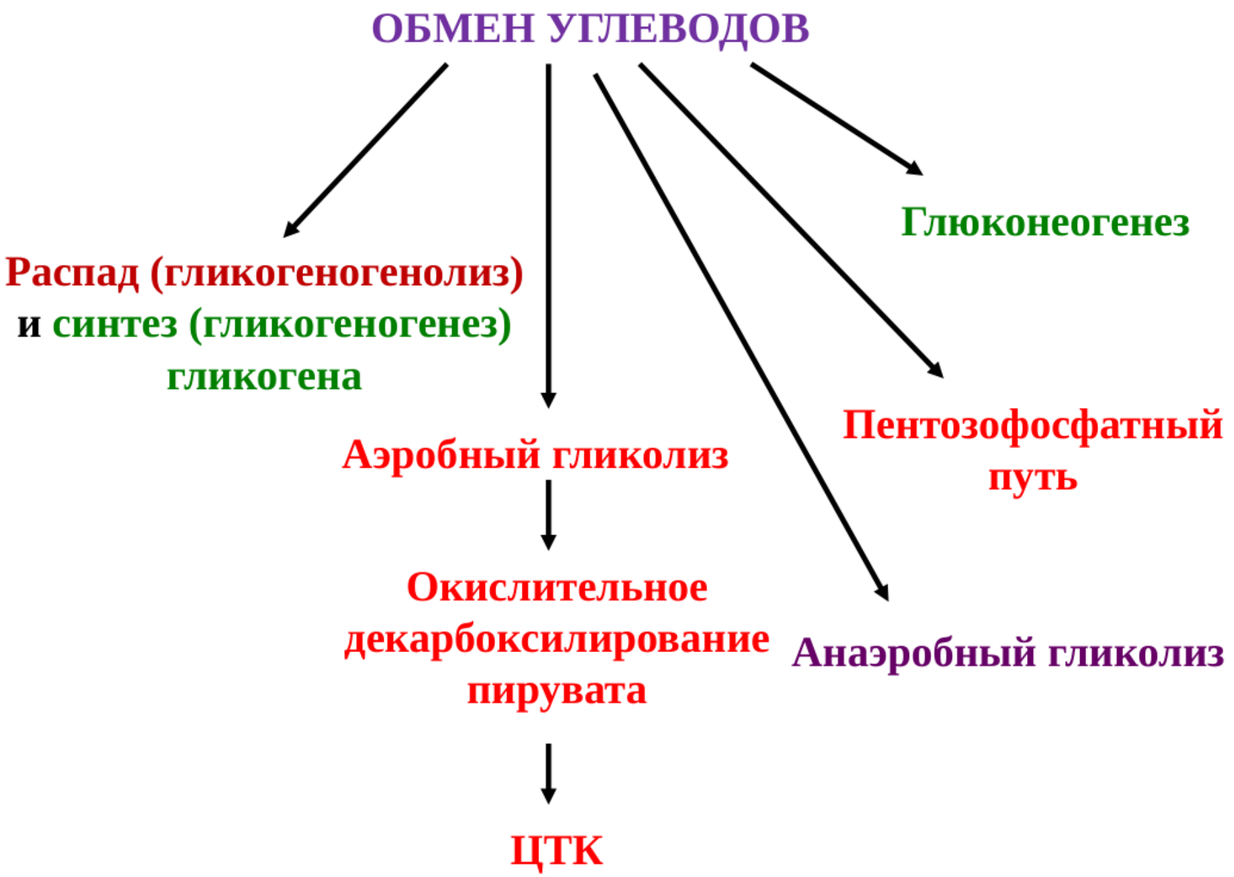
$$C_6H_{12}O_6 + 2H_3PO_4 + 2АДФ \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + \underline{2АТФ} + 2H_2O$$

глюкоза *фосфорная кислота* *этиловый спирт* *вода*

Углеводный обмен

Обмен углеводов в организме человека складываются из следующих процессов:

1. Расщепление в желудочно-кишечном тракте до моносахаридов поступающих с пищей полисахаридов и дисахаридов. Всасывание моносахаридов из кишечника в кровь.
2. Синтез и распад гликогена.
3. Анаэробное и аэробное расщепление глюкозы. В тканях существует два основных пути распада глюкозы: анаэробный путь гликолиза, который идет без потребления кислорода и аэробный путь прямого окисления глюкозы.
4. Пентозофосфатный путь.
5. Аэробный метаболизм пирувата, включающий окислительное декарбоксилирование пирувата и превращение ацетил-КоА в ЦТК.
6. Глюконеогенез, то есть образование углеводов из неуглеводных продуктов, таких как пируват, лактат, глицерин, аминокислоты.



Переваривание и всасывание углеводов

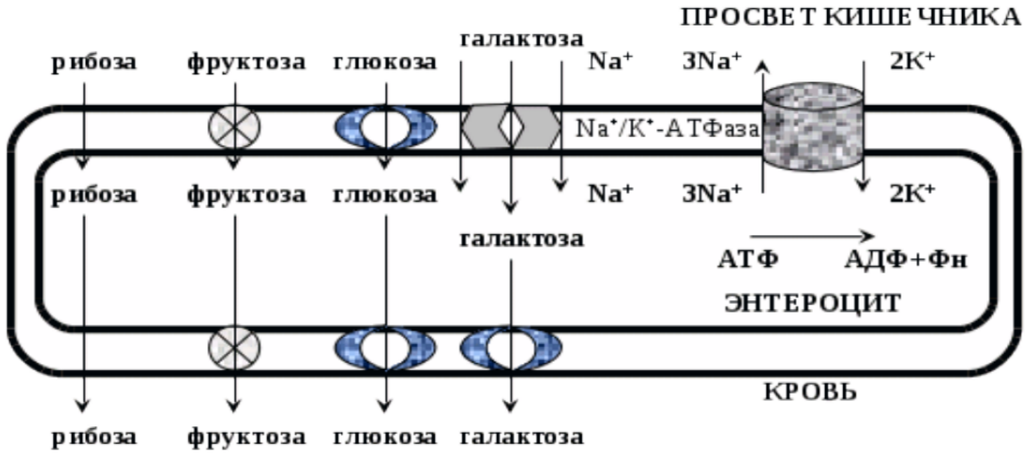
Этапы углеводного обмена

1. **Пищеварение.** В ротовой полости начинается переваривание крахмала и гликогена пищи под действием альфа-амилазы слюны. В желудке расщепление углеводов пищи не происходит, так как отсутствуют специфические ферменты гидролиза углеводов, а кислая среда желудочного сока (pH 1,5--2,5) подавляет активность ферментов слюны. В кишечнике pH 8,0-9,0 и действие альфа-амилазы слюны возобновляется. Сюда же поступает альфа-амилаза поджелудочной железы и оба фермента расщепляют крахмал и гликоген до мальтозы. В кишечнике мальтоза расщепляется до 2-х глюкоз под действием мальтазы. Здесь же под влиянием лактазы кишечного сока лактоза расщепляется до галактозы и глюкозы. Под действием сахаразы кишечного сока сахароза расщепляется до фруктозы и глюкозы.

   Таким образом, все углеводы пищи перевариваются в кишечнике до гексоз. Все процессы переваривания идут на поверхности эпителия кишечника и поэтому называются пристеночным пищеварением.

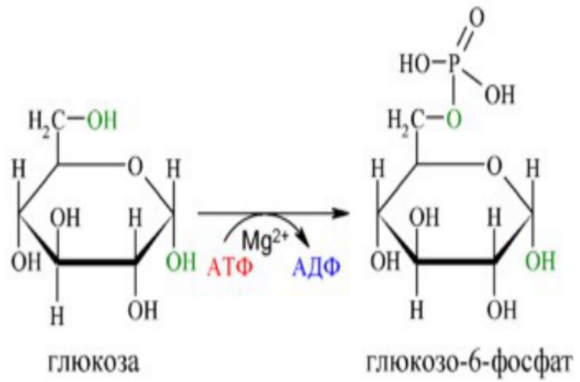
2. **Всасывание.** Транспорт моносахаридов в клетки слизистой оболочки кишечника может осуществляться путём диффузии (рибоза, ксилоза, арабиноза), облегчённой диффузии с помощью белков переносчиков (фруктоза, галактоза, глюкоза), и путем вторично-активного транспорта (галактоза, глюкоза). Вторично-активный транспорт галактозы и глюкозы из просвета кишечника в энтероцит осуществляется с импортом с Na^+. Через белок-переносчик Na^+ двигается по градиенту своей концентрации и переносит с собой углеводы против их градиента концентраций. Градиент концентрации Na^+ создаётся Na^+/K^+-АТФ-азой.

- При низкой концентрации глюкозы в просвете кишечника она транспортируется в энтероцит только активным транспортом, при высокой концентрации - активным транспортом и облегчённой диффузией. Скорость всасывания: галактоза > глюкоза > фруктоза > другие моносахариды. Моносахариды выходят из энтероцитов в направлении кровеносного капилляра с помощью облегченной диффузии через белки-переносчики.



Фосфорилирование глюкозы и гликогенез

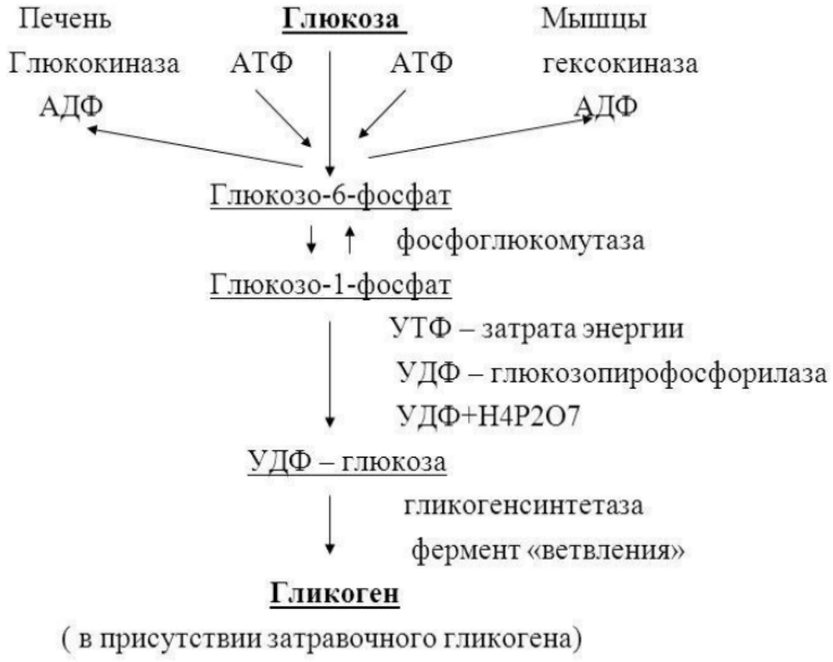
1. Фосфорилирование глюкозы



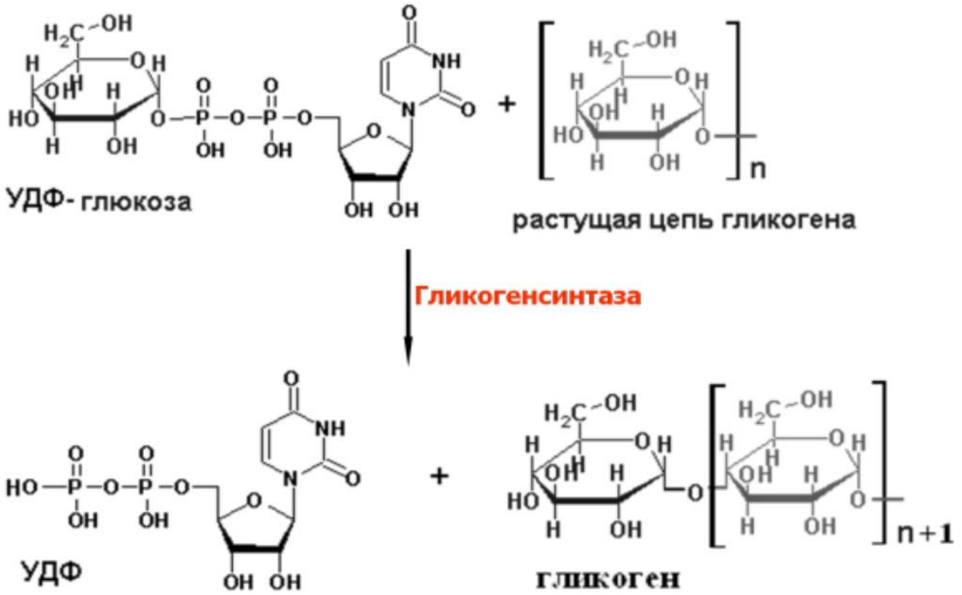
- В клетках глюкоза и другие моносахариды с использованием АТФ фосфорилируются до фосфорных эфиров. Фосфолирование протекает при участии ферментов гексокиназы в мышцах и глюкозокиназы в печени. Фосфорилирование моносахаридов приводит к образованию реакционно-способных соединений (реакция активации), которые не способны покинуть клетку т.к. нет соответствующих белков-переносчиков.

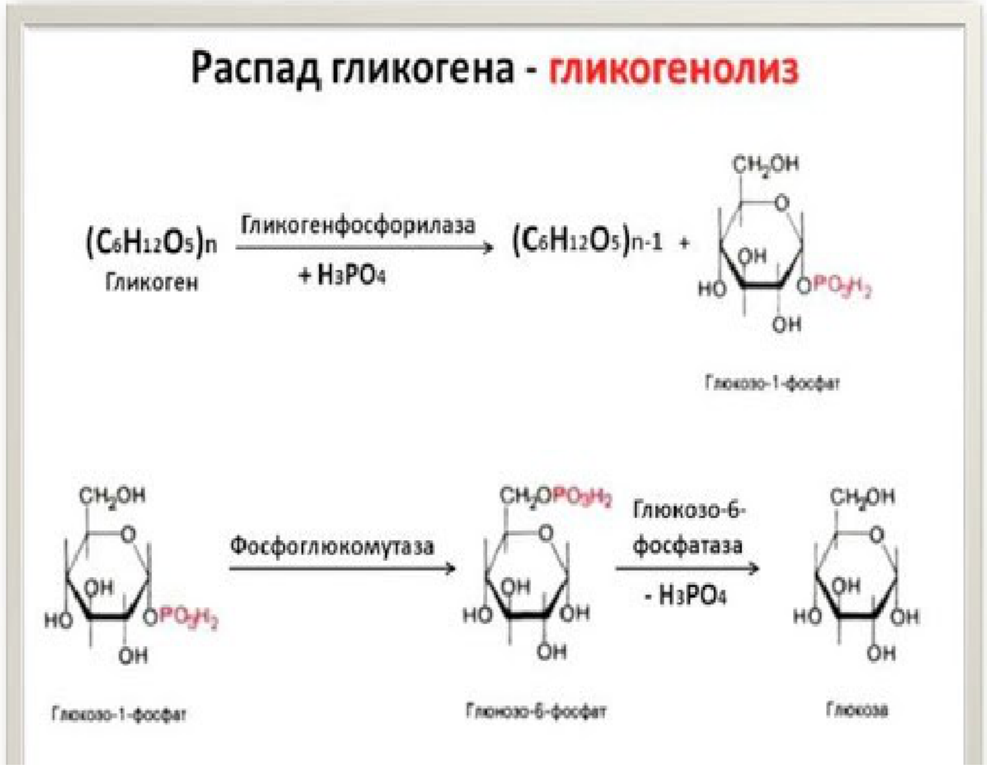
- **2. Гликогенез.** Глюкоза может откладываться в виде гликогена в печени и мышцах. Глюкозо-6-фосфат под влиянием ферментов гликогенсинтетазы и «ветвящего» фермента синтезирует гликоген – полимер, напоминающий по виду дерево. В молекулах гликогена может содержатся до миллиона моносахаридов.

Биосинтез гликоген в печени и мышцах



Гликогенез и гликогенолиз





3. Гликогенолиз - процесс распада гликогена. В мышцах гликоген используется в качестве источника энергии при интенсивной физической работе, а в печени распадается в ответ на снижение глюкозы при перерывах в приеме пищи или как стрессовая реакция.

В гликогенолизе непосредственно участвуют три фермента:

Фосфорилаза гликогена разрывает α -1,4-гликозидные связи с отщеплением глюкозо-1-фосфата. Фермент работает до тех пор, пока до точки ветвления (α -1,6-связи) не останется 4 остатка глюкозы.

α(1,4)-d(1,6)-Глюкантрансфераза - энзим, переносящий фрагмент трисахарида на другую цепь с образованием новой α -1,4-гликозидной связи. При этом на прежнем месте остается один остаток глюкозы и "открытая" действию катализатора доступная α -1,6-гликозидная связь.

Амило- α -1,6-гликозидаза («деветвящий» фермент) гидролизует последнюю с отрывом свободной (нефосфорилированной) глюкозы. В результате возникает цепь без ветвлений, вновь служащая субстратом для фосфорилазы.

Гликолиз

4. **Гликолиз** – последовательность реакций окисления глюкозы в результате которых:

- в анаэробных условиях образуется молочная кислота (лактат);
- в аэробных – пировиноградная кислот (пируват).
- Промежуточные метаболиты являются предшественниками для синтеза аминокислот, азотистых оснований, липидов и др. Окисление глюкозы сопровождается образованием АТФ путем субстратного фосфорилирования.
- В анаэробных условиях гликолиз – это единственный процесс в клетках, приводящий к образованию АТФ. В аэробных условиях образующийся из глюкозы в процессе гликолиза пируват поступает в цикл Кребса, где происходит его дальнейшее полное окисление до CO_2, H_2O и выделяется большое количество энергии.

- АНАЭРОБНЫЙ ГЛИКОЛИЗ (11 реакций)

- $C_6H_{12}O_6 + 2$ АДФ $+ 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ CH_3CHONCOOH$ (лактат) $+ 2$АТФ $+ 2H2O$

- АЭРОБНЫЙ ГЛИКОЛИЗ (10 реакций)

- $C_6H_{12}O_6 + 2$ АДФ $+ 2\ H_3PO_4 + 2$НАД$+ \rightarrow 2\ CH_3COCOOH$ (пируват) $+ 2$АТФ $+ 2H2O + 2$НАДН.Н+

Гликолиз (от греч. glykys - сладкий, lysys - распад) - один центральных путей катаболизма глюкозы.

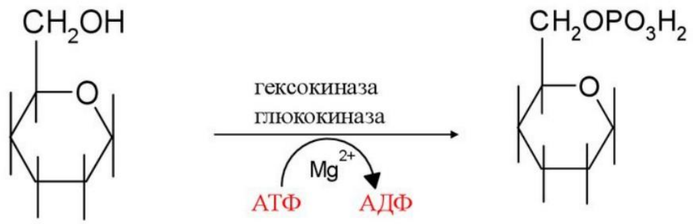
В процессе гликолиза происходит расщепление шестиуглеродной молекулы глюкозы на две трехуглеродные молекулы пирувата.

Подготовительная стадия, которая состоит из пяти этапов. Продуктом первой стадии гликолиза является глицеральдегид-3-фосфат. Подготовительная стадия гликолиза служит для того, чтобы превратить углеродные цепочки всех метаболизируемых гексоз в один общий продукт - глицеральдегид-3-фосфат. Вторая стадия гликолиза, состоящая из пяти ферментативных реакций сопровождается образованием энергии.

Аэробный гликолиз: последовательность реакций

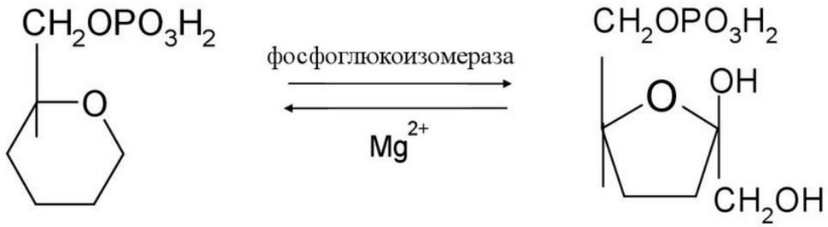
Стадии гликолиза

I. 1. Фосфорилирование глюкозы: реакция протекает необратимо, катализируется гексокиназой и требует затраты АТФ.



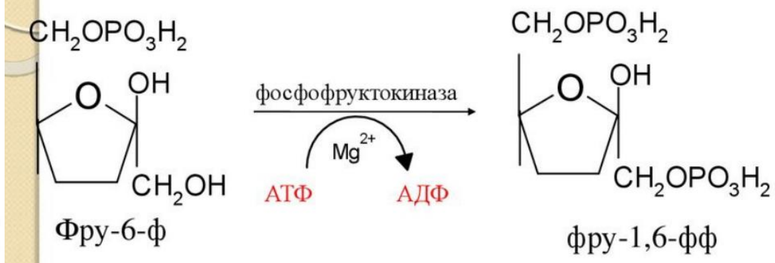
глю глю-6-ф

2. Превращение глю-6-ф в фру-6-ф.



Глю-6-ф Фру-6-ф

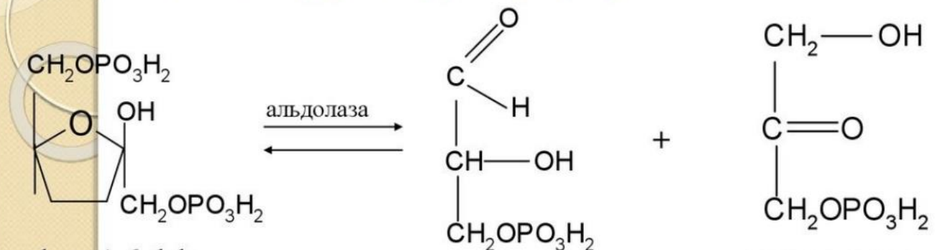
3. Фосфорилирование фру-6-ф во фру-1,6-фф.



Фру-6-ф фру-1,6-фф

Фосфофруктокиназа, также как гексокиназа является регуляторным ферментом. Эта стадия требует затраты АТФ. Это необратимая реакция гликолиза.

4. Расщепление фру-1,6-фф на фосфотриозы.



фру-1,6-фф глицеральдегид-3-ф 5% дигидрокси-ацетонфосфат 95%

В дальнейших превращениях принимает участие глицеральдегид-3-ф, который образуется в результате изомеризации дигидроксиацетонфосфата:

дигидроксиацетонфосфат ⟷ глицеральдегид-3-фосфат

5. Реакция превращения дигидроксиацетонфосфата в глицеральдегид-3-фосфат

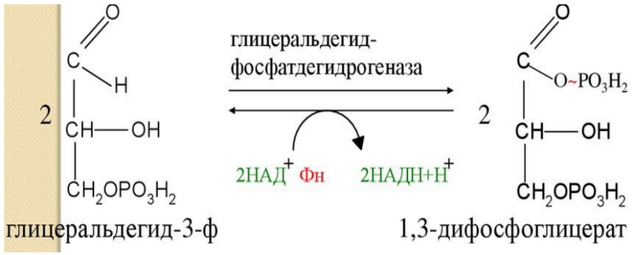


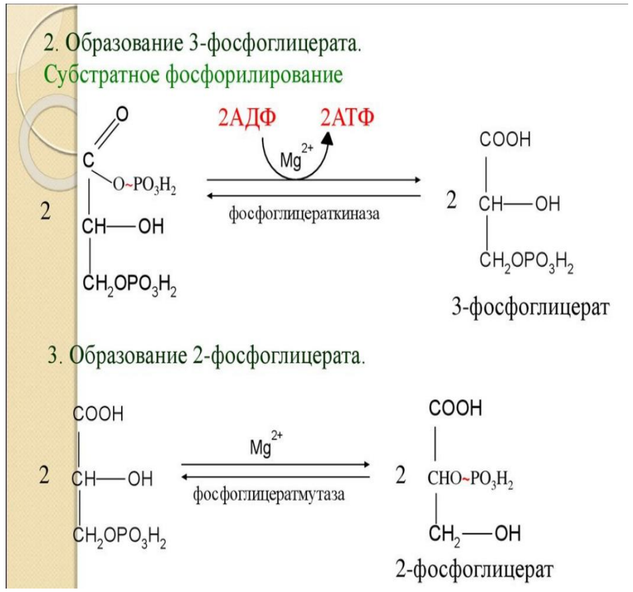
Дигидроксиацетон-фосфат Глицеральдегид-3-фосфат

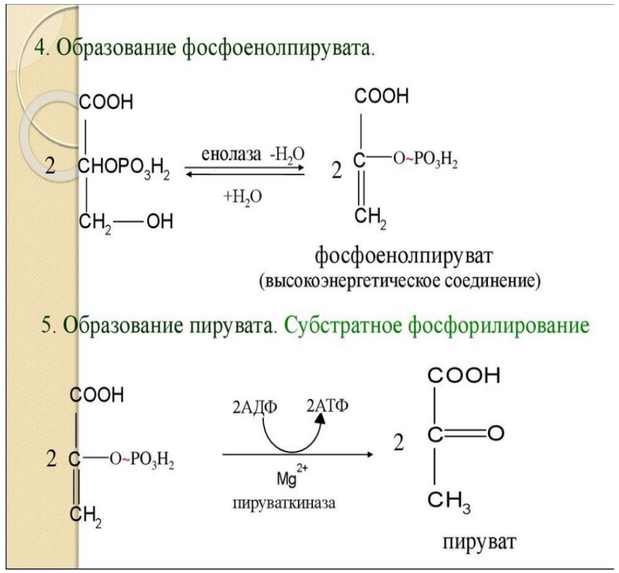
Аэробный и анаэробный гликолиз: реакции и баланс

На второй стадии гликолиза запасается энергия. Из одной молекулы глюкозы образуется две молекулы глицеральдегид-3-фосфата, который участвует в дальнейших превращениях.

1. Окисление глицеральдегид-3-фосфата до 1,3-дифосфоглицерата.



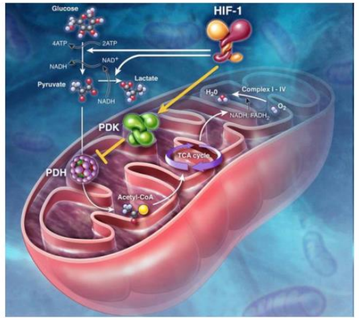




Баланс аэробного гликолиза

1 реакция - 1 АТФ
3 реакция - 1 АТФ
6 реакция + 3*2=6 / 2*2=4 АТФ
7 реакция + 1*2=2 АТФ
10 реакция + 1*2=2 АТФ
ИТОГО: 8/6 АТФ

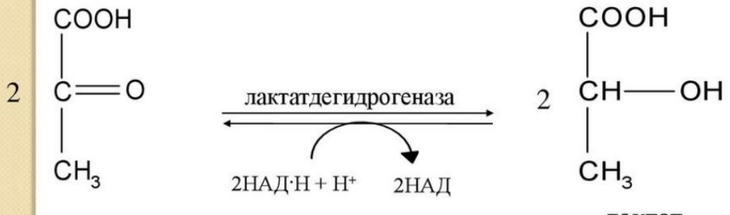
АНАЭРОБНЫЙ ГЛИКОЛИЗ - специфический путь катаболизма глюкозы, в результате которого происходит расщепление глюкозы с образованием двух молекул лактата без участия кислорода.



- **Отличие анаэробного гликолиза от аэробного заключается в последней 11 реакции.**

Дальше процесс идет в зависимости от наличия или отсутствия кислорода в клетке:

При анаэробных условиях, например в напряженно работающих скелетных мышцах, пируват превращается в лактат:



Баланс анаэробного гликолиза

- **1 реакция - 1 АТФ**
- **3 реакция - 1 АТФ**
- **6 реакция - нет запасания энергии**
- **7 реакция + 1*2=2 АТФ**
- **10 реакция + 1*2=2 АТФ**
- **ИТОГО: 2 АТФ**

Пентозофосфатный путь окисления глюкозы

Пентозофосфатный путь окисления глюкозы



Локализация: молочная железа, эмбриональная и жировая ткань, эритроциты, легкие, щитовидная железа, мозг, печень, надпочечники.

Все ферменты пентозофосфатного пути локализованы в цитозоле клетки.

В пентозофосфатном пути превращения глюкозы можно выделить:

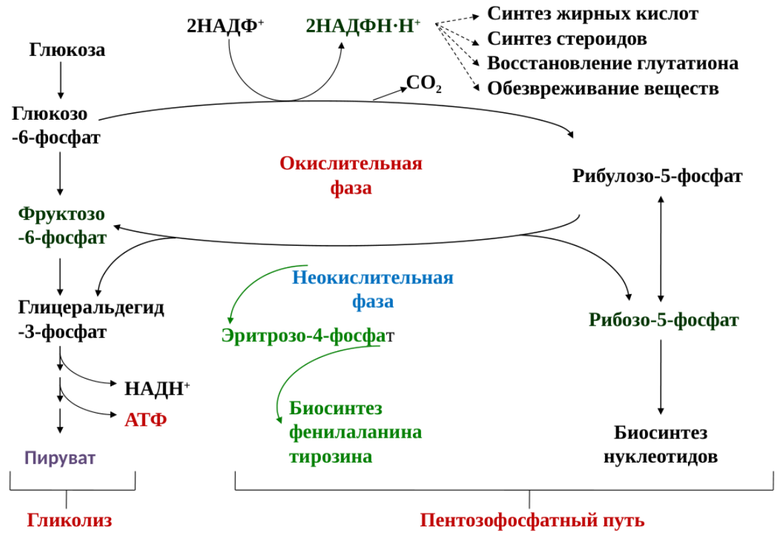
- **Окислительный этап**

1. **Поставляет клеткам кофермент NADPH (использующийся как донор водорода в реакциях восстановления и гидроксилирования)**
2. **Обеспечивает клетки рибозо-5- фосфатом (который участвует в синтезе нуклеотидов и нуклеиновых кислот).**

- **Неокислительный этапы**

1. **Изомерные превращения – катализируется ферментами транскетолазами (*кофактором которых является ТДФ- коферм. форма витамина B_1*) и трансальдолазами.**
2. **Эритрозо-4-фосфат является субстратом для биосинтеза фенилаланина и тирозина.**

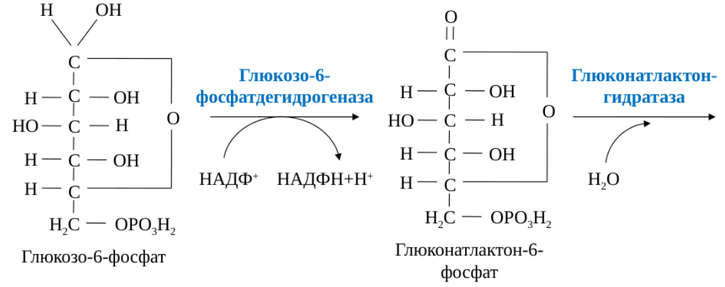
Метаболические функции пентозофосфатного пути

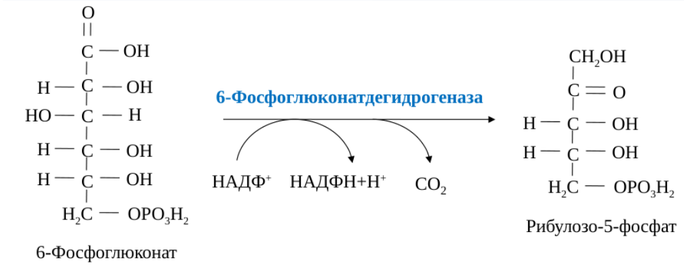


Условия протекания пентозофосфатного пути окисления глюкозы

- **Судьба глюкозо-6-фосфата — вступит ли он в гликолиз или пентозофосфатный путь — определяется потребностями клетки в данный момент, а также концентрацией $NADP^+$ в цитозоле.**
- **Без наличия акцептора электронов первая реакция пентозофосфатного пути (катализируемая глюкозо-6-фосфатдегидрогеназой) не будет идти. Когда клетка быстро переводит NADPH в $NADP^+$ в биосинтетических восстановительных реакциях, уровень $NADP^+$ поднимается, аллостерически стимулируя глюкозо-6-фосфатдегидрогензазу и тем самым увеличивая ток глюкозо-6-фосфата через пентозофосфатный путь.**
- **Когда потребление NADPH замедляется, уровень NADP+ снижается, и глюкозо-6-фосфат утилизируется гликолитически.**

Реакции окислительного этапа пентозофосфатного пути





Патология пентозофосфатного пути окисления глюкозы

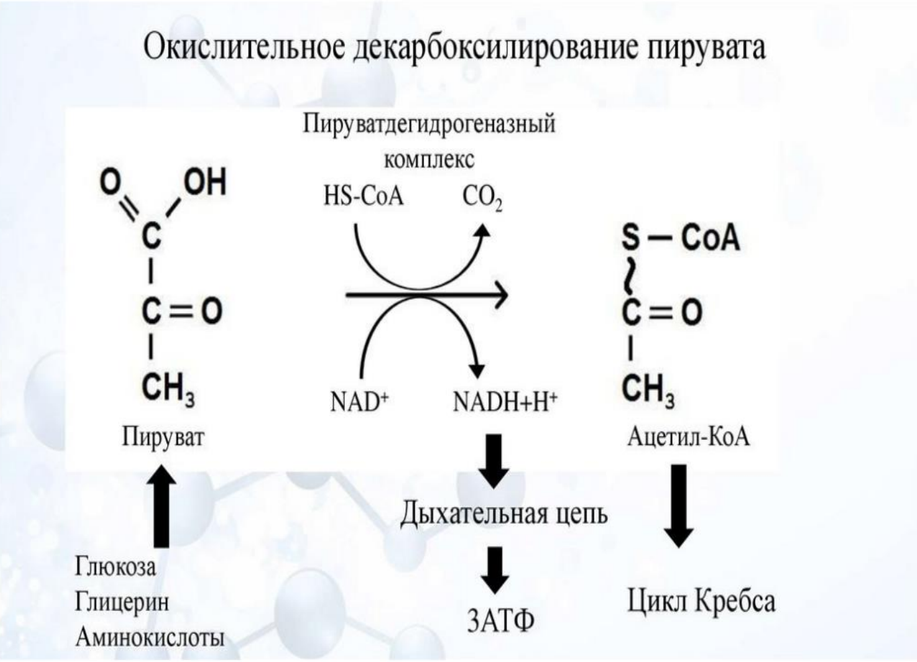
Генетический дефект фермента глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы является причиной:

1. **усиления процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ)**
2. **гемолиза эритроцитов**

Значение гликолиза и глюконеогенез

Значение гликолиза

- ***Промежуточные метаболиты*** *являются предшественниками для синтеза аминокислот, азотистых оснований, липидов и др.*
- *Окисление глюкозы сопровождается образованием* ***АТФ*** *путем субстратного фосфорилирования.*



- **5. Глюконеогенез** – это метаболический путь синтеза глюкозы из веществ неуглеводной природы. Основными неуглеводными предшественниками глюкозы являются L-лактат (образуется в ходе анаэробного распада углеводов), глицерин (образуется при распаде жиров), глюкогенные аминокислоты (образуются при распаде белков). Главным местом глюконеогенеза является печень, в меньшей степени он идет в почках, мозге, скелетных и сердечной мышцах.

