

# Энергия клетки: от питательных веществ к АТФ

Пища превращается в АТФ — универсальный источник энергии клетки.



# Как клетка получает и использует энергию

Энергетический обмен показывает, как клетка извлекает энергию из веществ и превращает ее в АТФ.



# Почему клетке нужна энергия



## Синтез веществ

Клетка непрерывно строит белки, нуклеиновые кислоты, липиды и другие вещества. Для этого нужны затраты энергии на химические реакции синтеза и работу ферментов.



## Деление

При делении клетке нужно удвоить наследственный материал и распределить его между дочерними клетками. Это возможно только при постоянном снабжении энергией.



## Движение

Движение клетки, сокращение мышечных волокон и работа ресничек требуют согласованного расхода АТФ. Без него не происходят направленные механические изменения.



## Внутренняя среда

Ионные насосы поддерживают состав цитоплазмы, мембранный потенциал и стабильность внутренней среды. Когда энергия заканчивается, нарушаются транспорт и жизненно важные реакции.

# АТФ и цикл АТФ↔АДФ

## 1. 1. Универсальный переносчик

АТФ содержит легко доступную энергию в фосфатных связях и поэтому служит универсальным переносчиком энергии во всех клетках организма.

## 2. 2. Расход энергии

При отщеплении конечного фосфата АТФ превращается в АДФ, и энергия высвобождается для химической работы, транспорта и сокращения.

## 3. 3. Восстановление запаса

Затем АДФ снова фосфорилируется до АТФ за счет энергии, полученной из питательных веществ, и цикл повторяется непрерывно.

# Источники энергии для клетки

## Глюкоза

Глюкоза — основной и наиболее быстро используемый источник энергии. Ее окисление дает клетке быстрый доступ к АТФ и промежуточным продуктам обмена.

## Жиры

Жиры содержат особенно много энергии и служат долговременным запасом. При их распаде образуется много восстановленных переносчиков, которые затем идут в дыхательную цепь.

## Аминокислоты

Часть аминокислот может использоваться как источник энергии, если поступление других веществ ограничено. Сначала они лишаются аминогруппы, а затем включаются в обмен.

## Перенос энергии

Во время окисления атомы водорода и электроны переносятся на  $\text{NAD}^+$  и  $\text{FAD}$ . Так образуются  $\text{NADH}$  и  $\text{FADH}_2$ , которые доставляют энергию дальше.

# Этапы гликолиза



## Подготовка глюкозы

В цитоплазме молекула глюкозы последовательно подготавливается к расщеплению. На этом этапе клетка тратит часть энергии, чтобы сделать процесс необратимым.

## Расщепление

Шестиуглеродная молекула распадается на две трехуглеродные. В результате формируются пируват, небольшое количество АТФ и восстановленный NADH.

## Итог

Гликолиз завершается образованием двух молекул пирувата. Это дает клетке первый энергетический выигрыш и материал для дальнейшего окисления.

# 2 АТФ

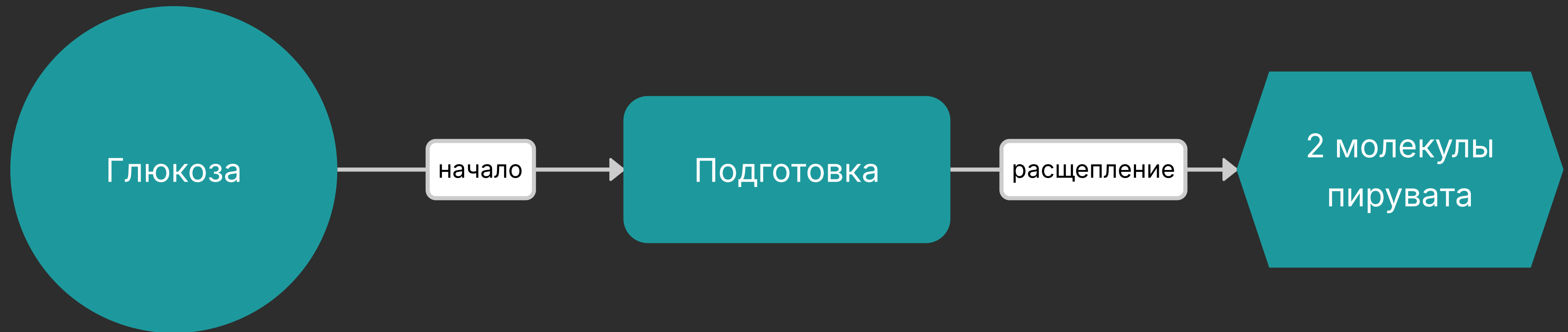
**Это чистая прибыль  
гликолиза на одну  
молекулу глюкозы.**

Эта чистая прибыль невелика, но именно она позволяет клетке быстро получить энергию до включения митохондрий.

*Школьный курс биологии; энергетический итог гликолиза.*

# Гликолиз как последовательность шагов

Три последовательных блока гликолиза: подготовка, расщепление и образование пирувата с выходом энергии.



# Пируват и митохондрия

## Переход в митохондрию

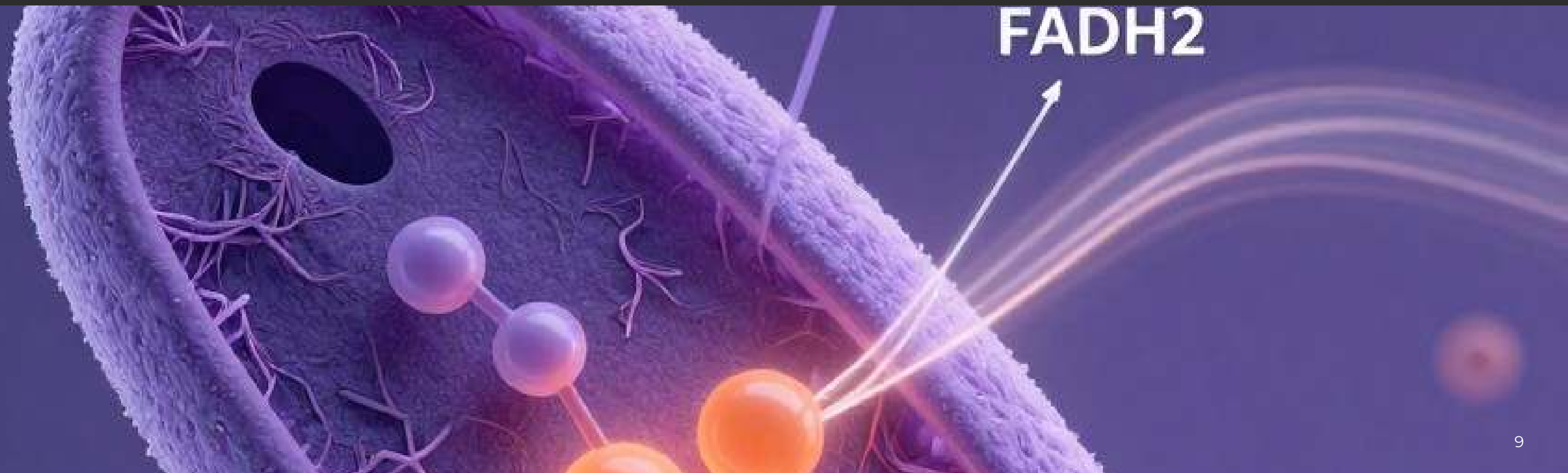
После гликолиза пируват поступает в митохондрию, где превращается в соединение, включаемое в дальнейшие реакции окисления. Это связывает цитоплазматический и митохондриальный этапы обмена.

## Окисление углерода

В цикле Кребса углеродный скелет молекул постепенно окисляется до  $\text{CO}_2$ . Одновременно энергия запасается в форме  $\text{NADH}$  и  $\text{FADH}_2$  для следующего этапа.

## Связь этапов

Митохондрия работает как система последовательных стадий: чем полнее окисляется вещество, тем больше восстановленных переносчиков и тем выше общий выход АТФ.



# 2 оборота

**На одну молекулу  
глюкозы приходится  
по одному обороту  
на каждый ацетил-КоА.**

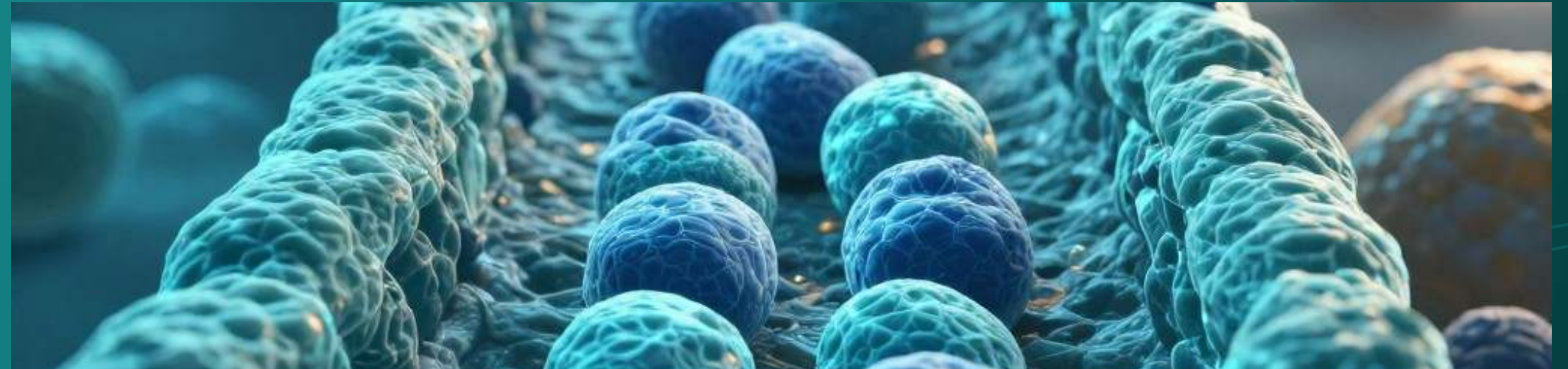
Цикл Кребса дает немного АТФ, но обеспечивает основную часть восстановленных переносчиков.

*Школьный курс биологии; из одной глюкозы образуются два ацетил-КоА.*

# Как дыхательная цепь превращает энергию электронов в протонный градиент

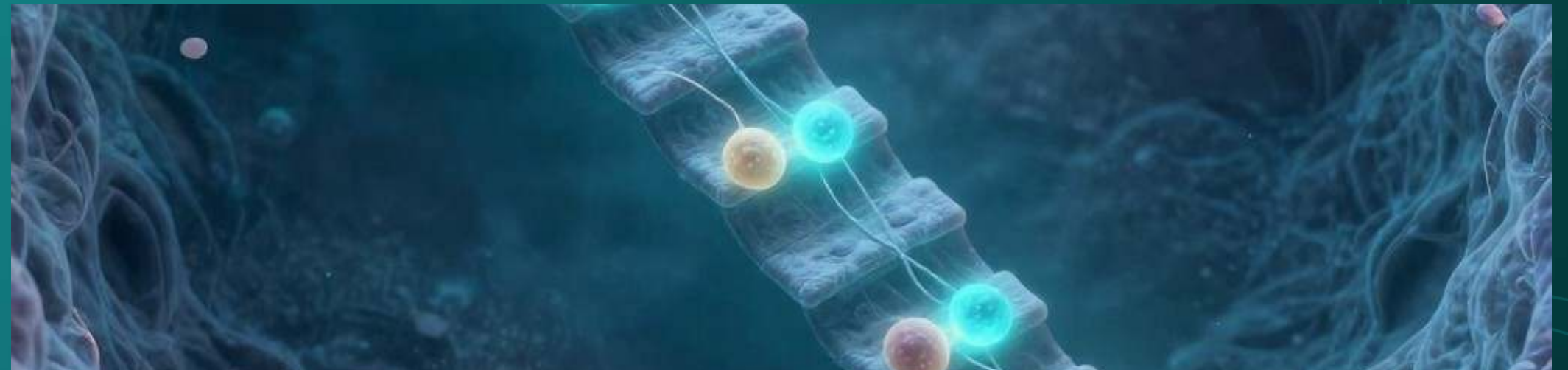
## Электроны в белковой эстафете

На внутренней мембране митохондрии выстроена целая цепь белков-переносчиков, словно эстафета. Электроны, принесенные NADH и FADH<sub>2</sub>, переходят от одного звена к другому, а выделяемая при этом энергия используется для накачивания протонов в межмембранное пространство.



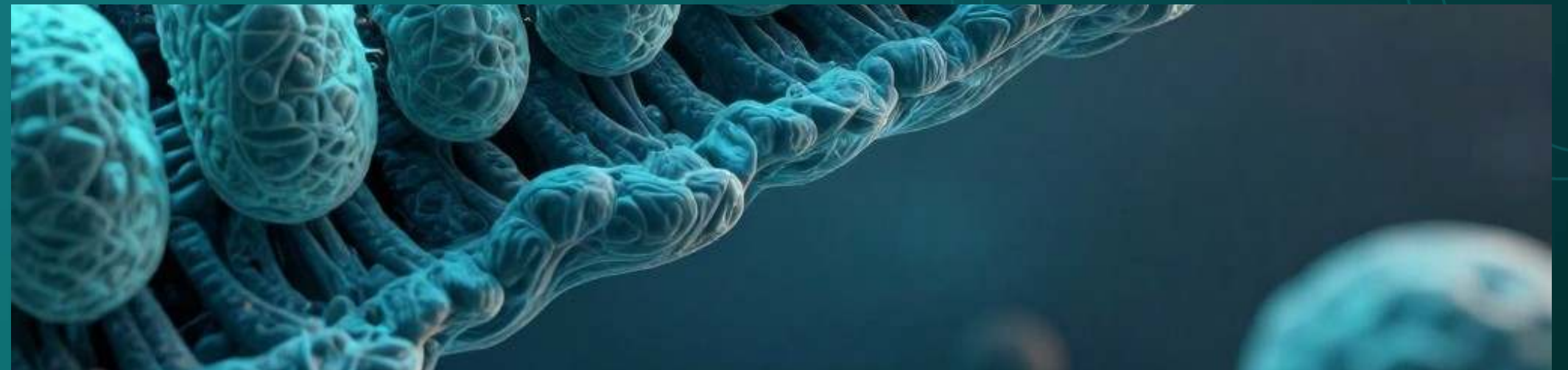
## Плавное высвобождение энергии

Каждый перенос электронов похож на спуск по ступеням: часть энергии освобождается постепенно, а не сразу. Благодаря этому клетка не теряет ее в виде тепла, а направляет на создание условий для будущего синтеза АТФ.



## Протонный запас для работы

За мембраной возникает разность зарядов и концентраций, которую можно сравнить с натянутой пружиной. Чем больше протонов накоплено снаружи внутренней мембраны, тем сильнее становится энергетический потенциал, готовый запустить образование АТФ.



# Последовательность образования АТФ в митохондрии

## 1. Поступление электронов

NADH и FADH<sub>2</sub> передают электроны белкам дыхательной цепи на внутренней мембране митохондрии.

## 2. Создание градиента

Энергия переноса используется для перекачки протонов в межмембранное пространство и накопления градиента.

## 3. Синтез АТФ

Протоны возвращаются через АТФ-синтазу, и этот поток запускает присоединение фосфата к АДФ.

# 1

**молекула кислорода  
принимает электроны  
в конце дыхательной  
цепи**

Кислород необходим как конечный акцептор электронов: без него дыхательная цепь не работает, а основная часть энергии глюкозы не превращается в АТФ.

*Школьный курс биологии: тема «Клеточное дыхание»*

# Как клетка выживает без кислорода

1.

## 1. Зачем оно нужно

Когда кислорода не хватает, клетка не прекращает работу полностью. Она переключается на брожение, чтобы восстановить  $\text{NAD}^+$  и сохранить ход гликолиза, пусть и с минимальным энергетическим результатом.

2.

## 2. Лактатный вариант

При лактатном брожении пируват принимает электроны и превращается в молочную кислоту. Такой путь особенно характерен для мышечных клеток при интенсивной нагрузке и для некоторых микроорганизмов.

3.

## 3. Спиртовый вариант

При спиртовом брожении пируват распадается с образованием этанола и углекислого газа. Этот путь широко известен у дрожжей и лежит в основе хлебопечения и виноделия.

4.

## 4. Главная функция

Общий смысл брожения не в большом выходе АТФ, а в поддержании работы гликолиза. Именно восстановление  $\text{NAD}^+$  позволяет клетке временно пережить дефицит кислорода.



# Сравнение аэробного и анаэробного путей

Таблица показывает, что путь получения энергии зависит не только от условий среды, но и от устройства клетки. Чем полнее окисление глюкозы, тем выше выход АТФ.

Аэробное дыхание намного эффективнее, но без кислорода клетка может временно опираться только на брожение и гликолиз.

| Путь       | Условия             | Выход АТФ |
|------------|---------------------|-----------|
| Аэробный   | O <sub>2</sub> есть | 30–32     |
| Анаэробный | O <sub>2</sub> нет  | 2         |

Школьный курс биологии; общепринятые значения энергетического выхода глюкозы

# Куда уходит энергия АТФ

## Синтез белка

Синтез белков требует энергии на образование пептидных связей, работу рибосом и перемещение РНК. Без АТФ клетка не сможет быстро обновлять ферменты и строить новые структуры.

## Активный транспорт

Мембраны поддерживают различия концентраций ионов, а насос  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  постоянно переносит их против градиента. Этот процесс критически важен для возбудимости клеток и стабильности внутренней среды.

## Мышечная работа

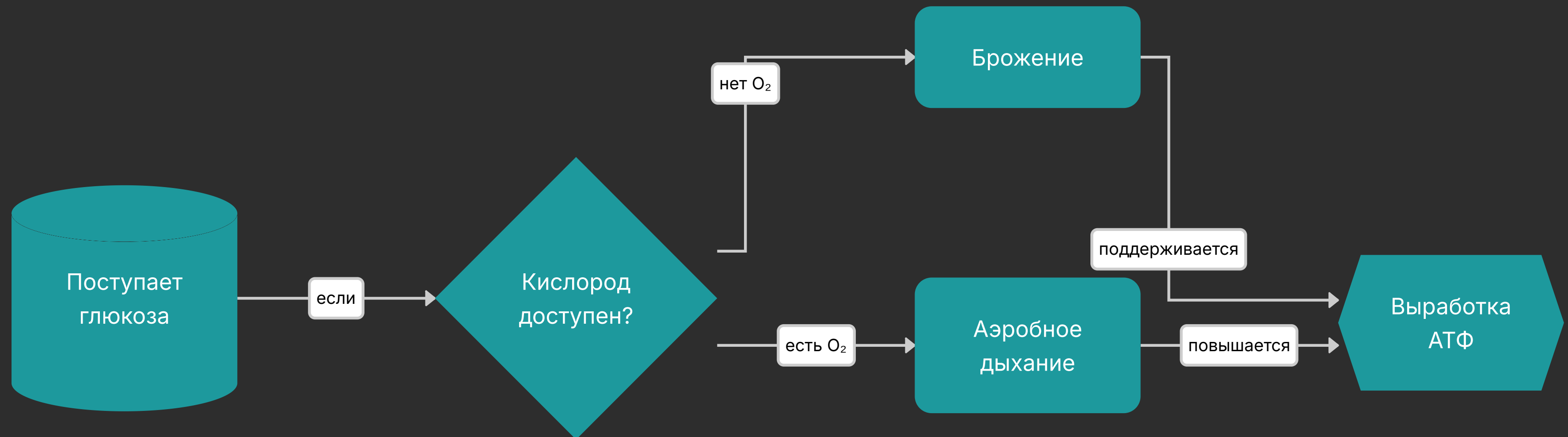
Сокращение мышц основано на цикле взаимодействия актина и миозина, где АТФ запускает и завершает каждый шаг. Поэтому при дефиците энергии движение быстро ослабевает.

## Другие энергозатраты

Деление клетки, движение ресничек и работа мембранных переносчиков тоже зависят от АТФ. Эти процессы особенно чувствительны к нарушению энергетического обмена и быстро замедляются при его сбое.

# Выбор энергетического пути в клетке

Путь зависит от наличия кислорода и потребности клетки в энергии



# Основные места энергетического обмена в клетке



## Цитоплазма и быстрый старт

Гликолиз происходит в цитоплазме, поэтому клетка может быстро получить небольшое количество АТФ почти сразу после поступления глюкозы. Это особенно важно при кратковременной нехватке кислорода.



## Матрикс и полное окисление

Цикл Кребса идет в митохондриальном матриксе, где углеродные соединения полностью окисляются до  $\text{CO}_2$ . Здесь формируются NADH и  $\text{FADH}_2$  — основные переносчики электронов для следующего этапа.



## Внутренняя мембрана и градиент

Дыхательная цепь расположена на внутренней мембране митохондрии. Ее белки создают протонный градиент, который затем используется для работы АТФ-синтазы и массового синтеза АТФ.



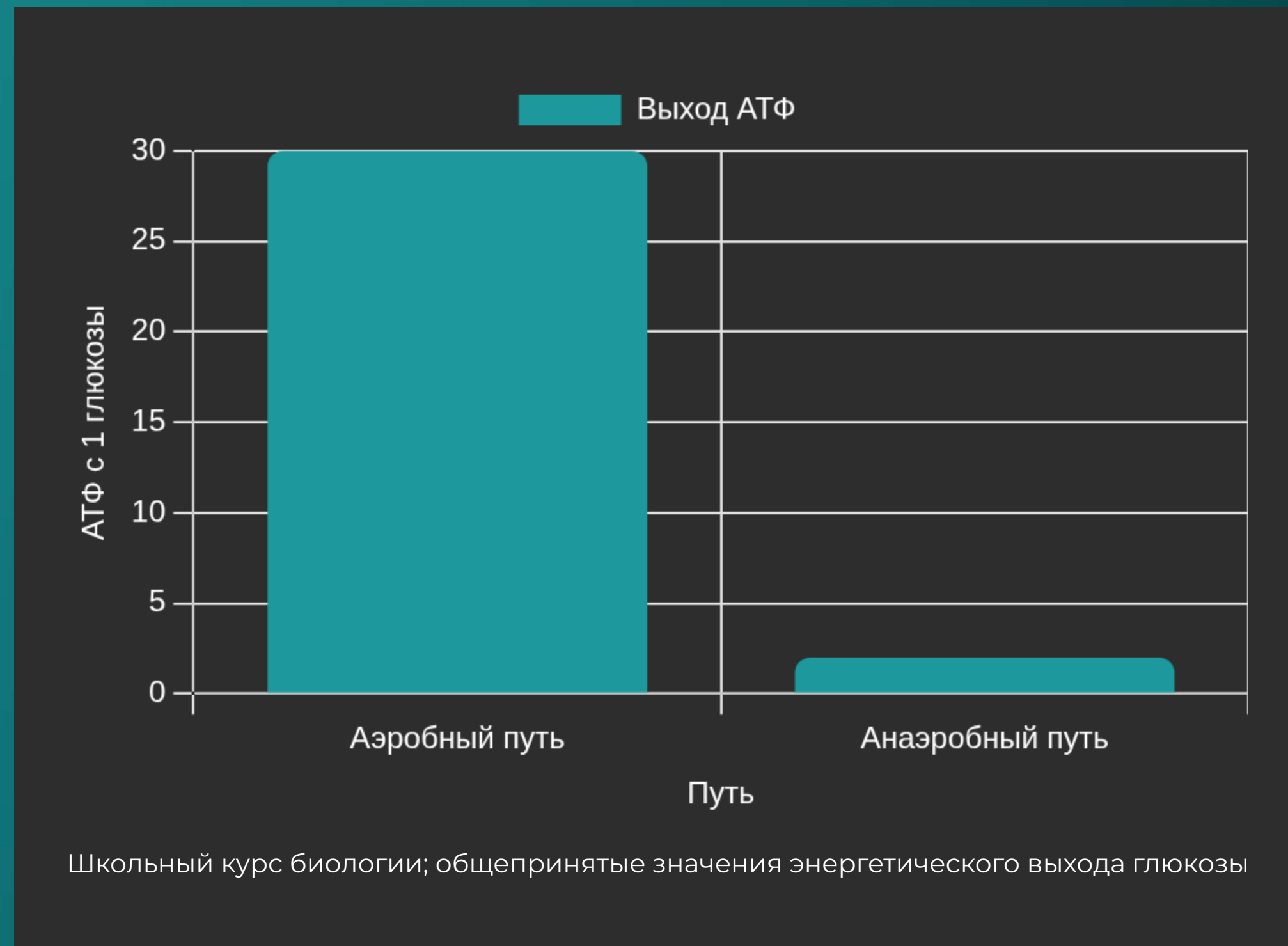
## Почему это удобно

Разделение этапов по разным компартментам делает обмен энергии точным и эффективным. Клетка одновременно сохраняет скорость гликолиза и получает высокий выход АТФ в митохондриях.

# Сравнение общего выхода энергии

Схема показывает, что энергетический обмен меняет не источник, а форму энергии: от химических связей глюкозы к АТФ, а затем к клеточной работе.

При наличии кислорода клетка получает в разы больше АТФ, поэтому митохондрии резко повышают энергетическую отдачу.



# От пищи к работе клетки

Энергия в клетке не хранится в одной форме: она проходит путь от питательных веществ к АТФ, а затем к конкретной работе. Именно поэтому клетка непрерывно дышит, синтезирует и регулирует внутреннюю среду.

