

# Биоэнергетика мышечной деятельности

лекция





# Биоэнергетика мышечной деятельности

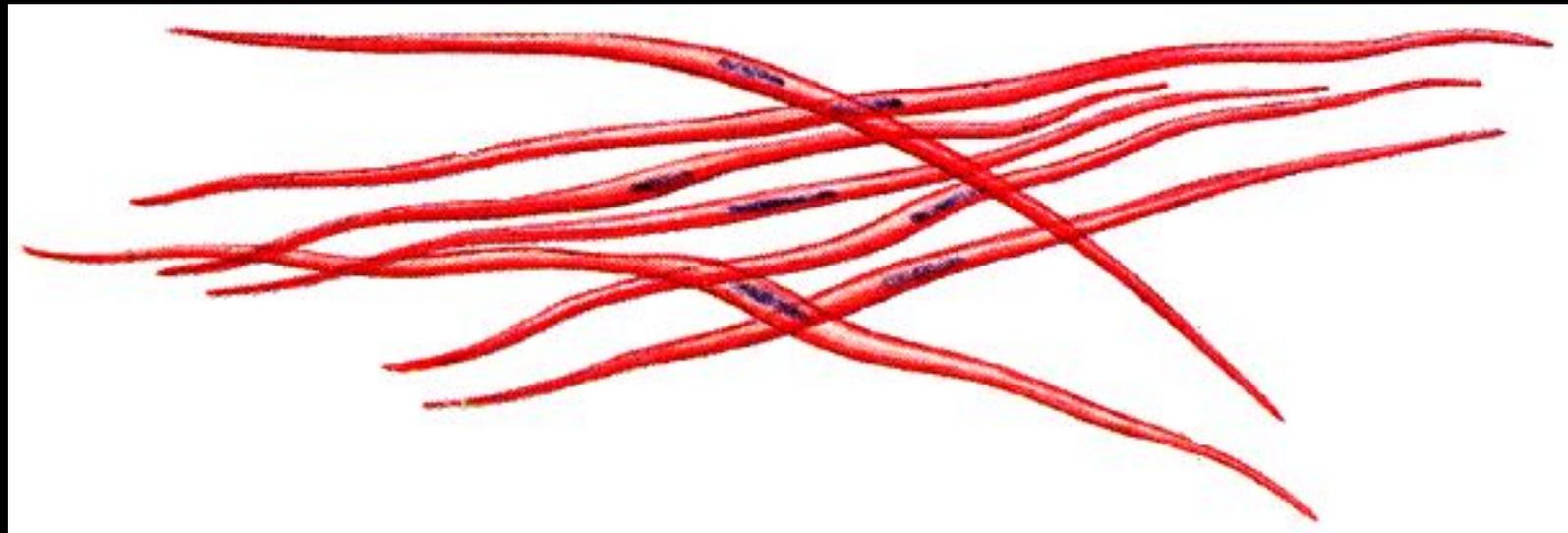
- Мышечная ткань составляет около 40% от веса тела мужчины и до 30% - от веса тела женщины.
- Биохимические процессы, протекающие в мышцах, оказывают большое влияние на весь организм.
- **Важнейшей особенностью работы мышц является преобразование химической энергии АТФ в механическую энергию сокращения и движения.**

# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- У животных и человека имеется два основных типа мышц: **поперечно-полосатые** и **гладкие**.
- **Поперечно-полосатые** мышцы прикрепляются к костям, т.е. к скелету, и поэтому называются **скелетными**.
- **Поперечно-полосатые** мышечные волокна также составляют основу сердечной мышцы – **миокарда**.
- **Гладкие мышцы** находятся в **стенках кровеносных сосудов и внутренних органов: кишечника, бронхов, мочевого пузыря и др.**

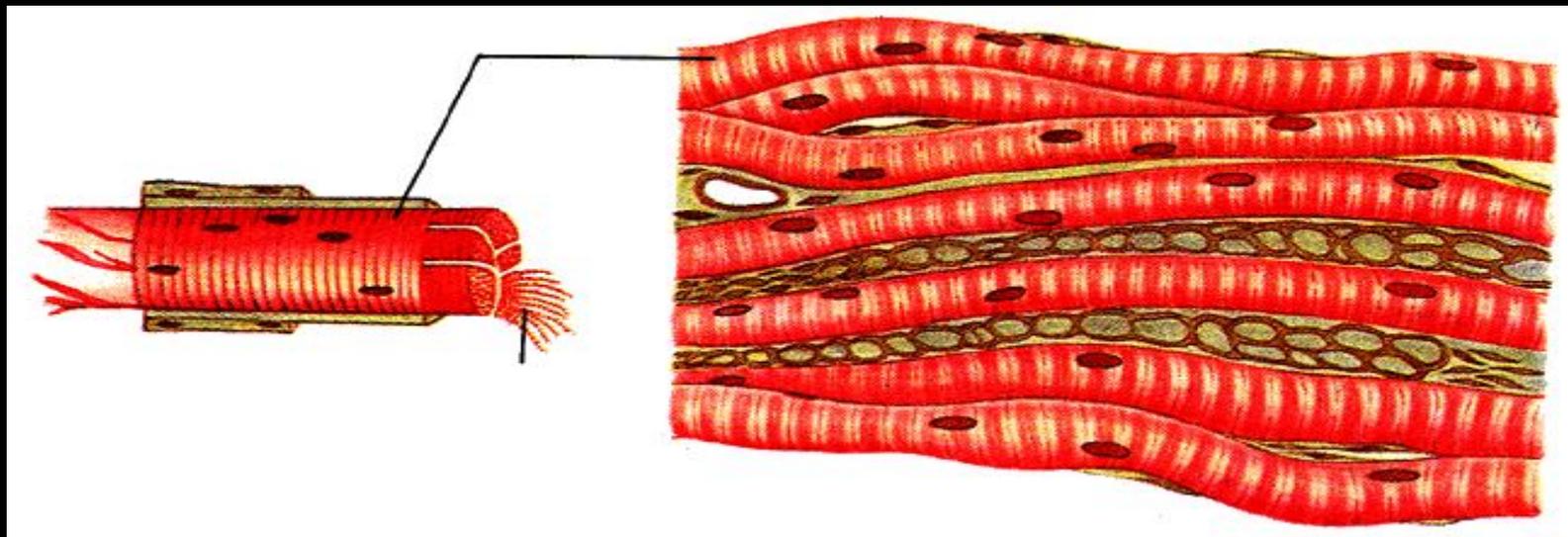
# Мышечная ткань

**гладкая**



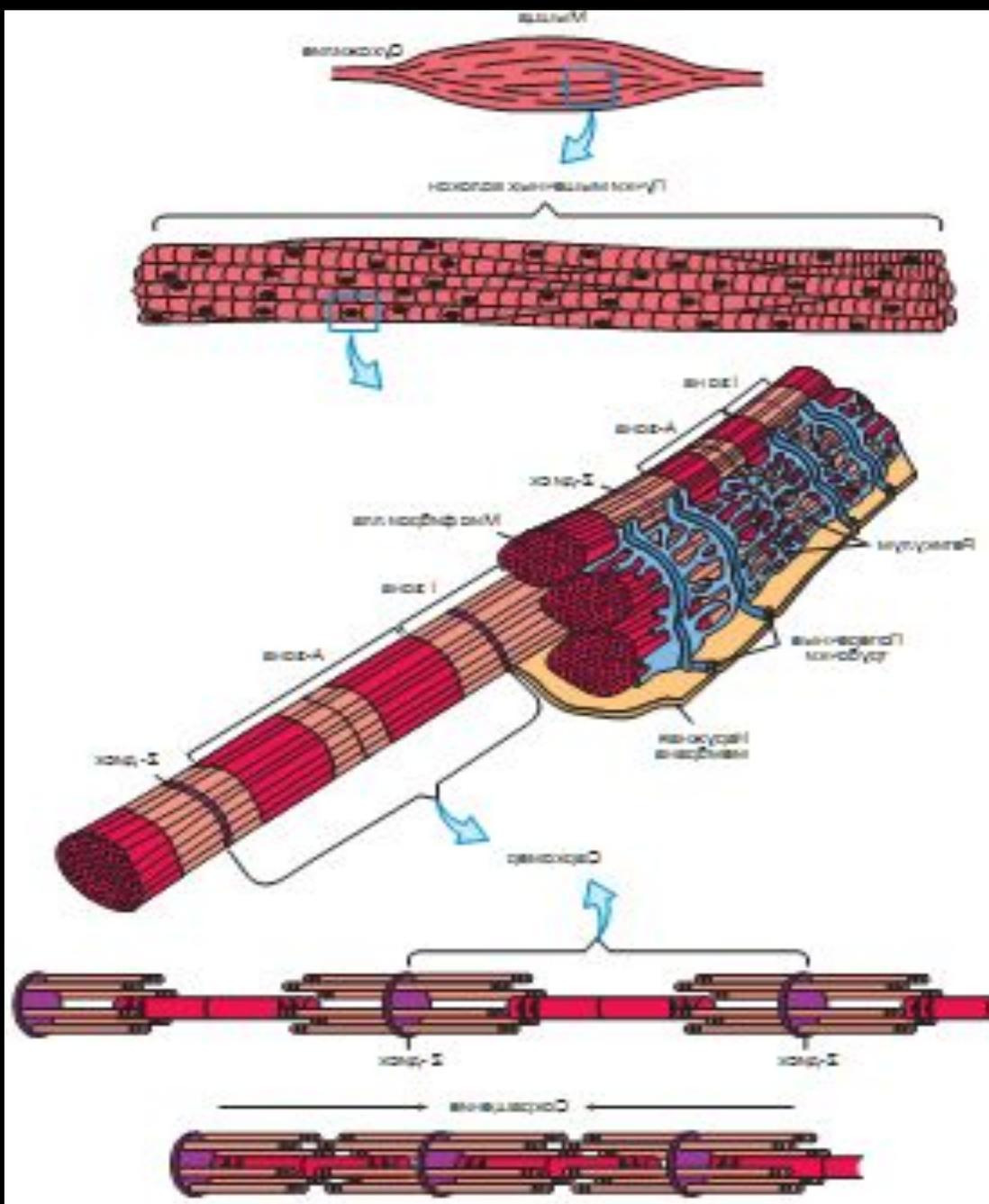
**поперечно-полосатая:**

- скелетная
- сердечная



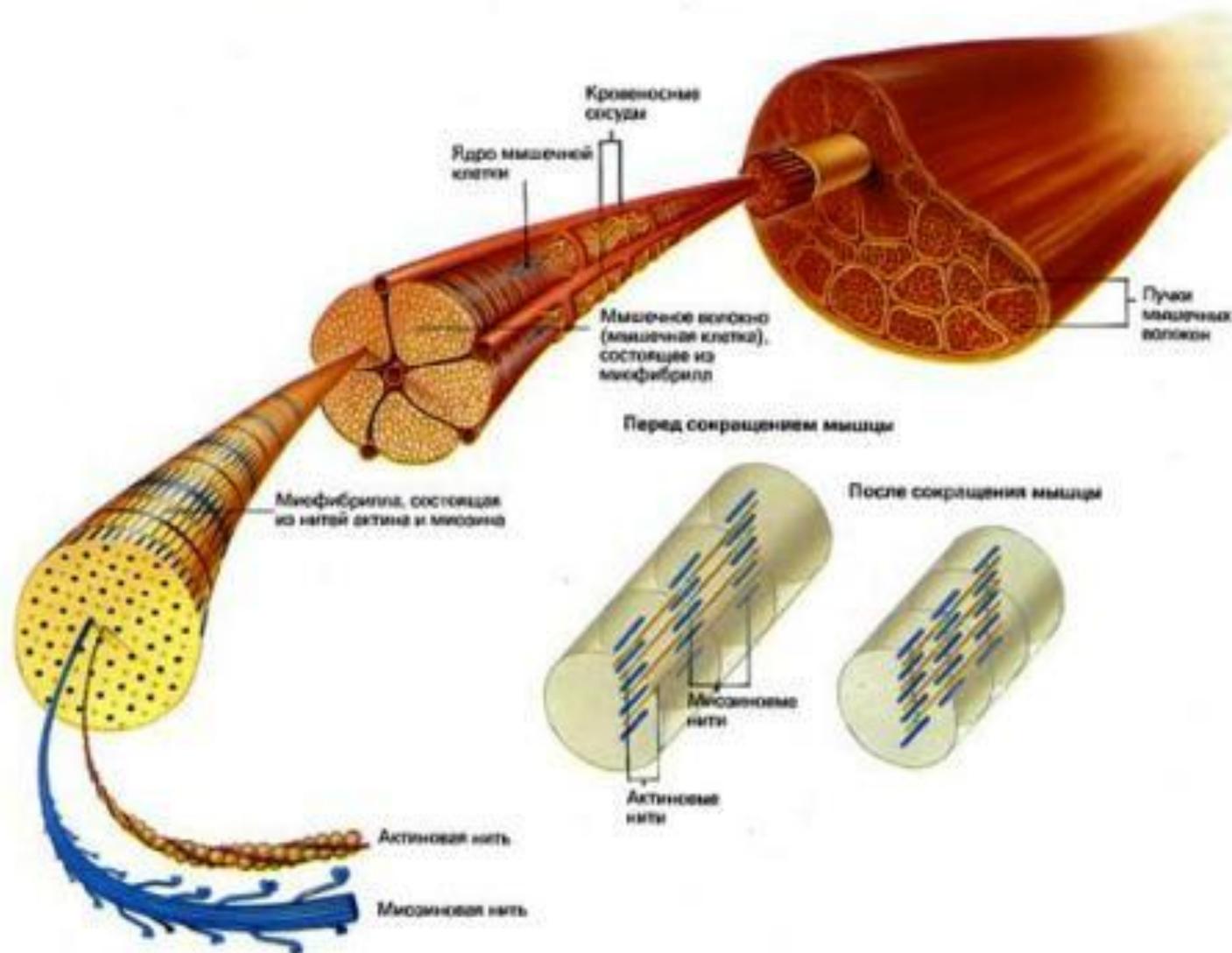
# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- Каждая **поперечно-полосатая мышца** состоит из нескольких тысяч волокон, объединенных прослойками из соединительной ткани и такой же оболочкой – фасцией.
- **Мышечные волокна** (или **мышечные клетки - миоциты**) представляют собой сильно вытянутые **многоядерные клетки**: длина их достигает от **0,1 до 2-3 см**, а в некоторых мышцах – более **10 см**;
- Мышечные волокна объединены в пучки.



# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

Структура произвольно сокращающейся мышцы



# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- Как и любая клетка, **МИОЦИТ** содержит общие (обязательные) органоиды:
- *ядро;*
- *митохондрии;*
- *цитоплазматическую сеть (саркоплазматическую сеть);*
- клеточную оболочку мышечной клетки — *сарколемму.*

# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- Основной особенностью **МИОЦИТОВ** является наличие сократительных элементов – **миофибрилл**;
- Миофибриллы занимают большую часть мышечных клеток, их диаметр около **1 мм**.
- В саркоплазме миоцитов есть белок - **миоглобин**, который как и гемоглобин крови **связывает кислород**, создавая его запас;
- **Основной углевод мышечной ткани – гликоген**. Концентрация гликогена составляет около **1 % массы мышц**.
- **Общие запасы гликогена в мышцах составляют около 400 г, в печени — около 70-80 г.**

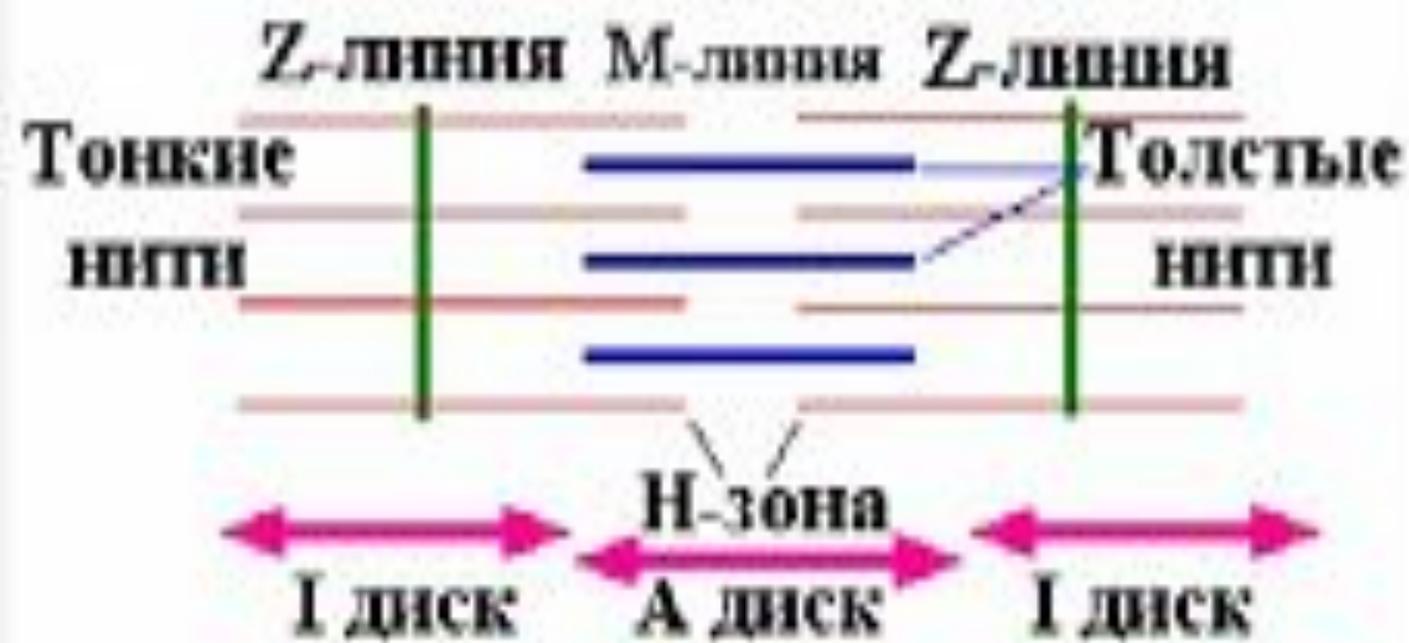
# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- При изучении структуры миофибрилл с помощью электронного микроскопа было установлено, что **миофибриллы** являются сложными структурами, простроенными из большого числа **мышечных нитей** (протофибрилл) двух типов – **толстых** и **тонких**.
- Толстые нити имеют диаметр **15 нм**, тонкие – **7 нм**;

# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- В середине пучка тонких нитей поперечно располагается тонкая пластинка из белка, которая фиксирует положение мышечных нитей в пространстве. Она называется Z-линией.
- Участок миофибриллы между соседними Z-линиями называется саркомером.
- Длина саркомера достигает 2-2,5 мкм. Каждая миофибрилла состоит из нескольких тысяч саркомеров.
- Саркомер - структурно-функциональная единица мышечной ткани;
- Толстые и тонкие нити состоят только из белков: актина и миозина;

Саркомер



# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

- Мышечное сокращение является сложным процессом, в ходе которого происходит преобразование энергии химических связей АТФ в механическую работу, совершаемую мышцей.
- **Источником энергии**, необходимой для сокращения мышц, является **АТФ**.
- В этом процессе участвуют мышечные белки и **ионы  $Ca^{2+}$**  в саркоплазме миоцитов, концентрация которых повышается при прохождении нервного импульса – сигнала к сокращению;
- Во время мышечных сокращений происходит **скольжение тонких нитей вдоль толстых**, что приводит к **укорочению миофибрилл** и всего **мышечного волокна**.

# СТРОЕНИЕ МЫШЦ

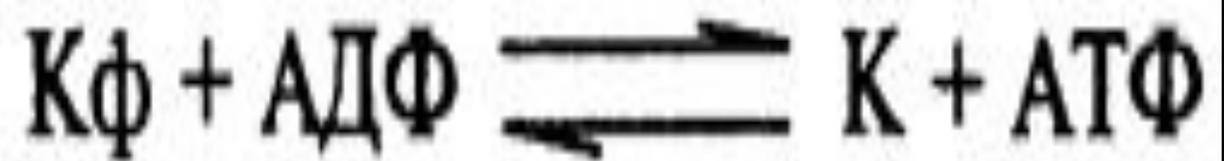
- Расслабление мышц тоже сопровождается затратой энергии.
- Универсальный источник – АТФ.
- Содержание АТФ в мышце относительно постоянно: около 0,25% массы мышцы.
- Запасов АТФ в мышце хватает только на 3 - 4 одиночных сокращения (1,5-2 секунды работы).
- ПОЭТОМУ необходимо постоянное и интенсивное восполнение АТФ.
- Что и происходит в мышцах (очень быстрый ресинтез АТФ).

# Механизмы энергообеспечения мышц

1. Специальные реакции субстратного фосфорилирования;
2. Гликолиз, гликогенолиз (анаэробные);
3. Окислительное фосфорилирование.
  - *Первые 2 пути – без кислорода!*

## Реакции субстратного фосфорилирования

- **1. Синтез АТФ из креатинфосфата - креатинфосфокиназная реакция;**
- Креатинфосфат (КТФ) - **макроэргическое вещество**, которое при исчерпании запасов АТФ в работающей мышце отдает фосфорильную группу на АДФ;



- Это самый быстрый способ ресинтеза АТФ;
- **Запасов креатинфосфата хватает для обеспечения мышечной работы в течение примерно 20 сек. !!!**
- **Этот путь максимально эффективен:**
  - не требует присутствия кислорода;
  - не дает нежелательных побочных продуктов;
  - включается мгновенно.

Его недостаток - резерва КТФ хватает только на 20 секунд мышечной работы.

## 2. Миокиназная реакция.

- Протекает только в мышечной ткани.
- Суть ее состоит в том, что при взаимодействии 2 молекул АДФ образуется 1 молекула АТФ:
- $\text{АДФ} + \text{АДФ} = \text{АТФ} + \text{АМФ}$ .
- Реакция катализируется миокиназой (аденилаткиназой);
- **Условия для включения миокиназной реакции возникают при выраженном мышечном утомлении.**
- Эта реакция мало эффективна;
- Но накопление в саркоплазме миоцитов АМФ активирует ферменты гликолиза, что приводит к повышению скорости анаэробного ресинтеза АТФ

# АНАЭРОБНЫЕ ГЛИКОЛИЗ и ГЛИКОГЕНОЛИЗ

- Энергетический эффект гликолиза невелик: **2 молекулы АТФ при окислении 1 молекулы глюкозы;**
  - *Примерно половина всей выделяемой энергии в данном процессе превращается в тепло и не может использоваться при работе мышц; а температура мышц повышается до 40 градусов и даже выше!*
- Кроме того, конечный продукт гликолиза – молочная кислота: мышцы закисляются; ферменты, регулирующие сокращение мышц, угнетаются;
- **Гликолиз начинается не сразу – а только через 10-15 с после начала мышечной работы!**

# АНАЭРОБНЫЕ ГЛИКОЛИЗ и ГЛИКОГЕНОЛИЗ

- Гликолитический ресинтез АТФ может достигать предельной интенсивности к 30-50 сек работы;
- При этом уровень лактата в крови сильно возрастает.

- Но все равно этот путь энергообеспечения очень важен для упражнений, длительность которых составляет от 30 до 150 с.
- К ним относятся бег на средние дистанции, плавание на 100 и 200 м, велосипедные гонки на треке и др.
- Также за счет энергии гликолиза совершаются длительные ускорения по ходу и на финише дистанции.

# Окислительное фосфорилирование

- Преимущества:
- Это наиболее энергетически выгодный процесс - синтезируется 38 молекул АТФ при окислении одной молекулы глюкозы.
- Имеет самый большой резерв субстратов: может использоваться глюкоза, гликоген, глицерин, кетоновые тела.
- Продукты распада ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) практически безвредны.
- Недостаток:
- требует повышенных количеств кислорода.

Важную роль в обеспечении мышечной клетки кислородом играет миоглобин, у которого сродство к кислороду больше, чем у гемоглобина: при парциальном давлении кислорода, равном 30 мм.рт.ст., миоглобин насыщается кислородом на 100 %, а гемоглобин - всего на 30 %. Поэтому миоглобин эффективно отнимает у гемоглобин доставляемый им кислород.

## Изменение метаболизма при мышечной работе

- Уменьшение концентрации АТФ приводит к использованию КТФ (в креатинфосфокиназной реакции);
- Далее включается гликолиз;
- Так как системе окислительного фосфорилирования необходима 1 мин для запуска.
- Это пусковая фаза мышечной работы;
- Дальше изменения метаболизма зависят от интенсивности мышечной работы.

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- 1. Если мышечная работа длительная и небольшой интенсивности, то в дальнейшем клетка получает энергию путем окислительного фосфорилирования - это работа в "аэробной зоне";
- 2. Если мышечная работа субмаксимальной интенсивности, то дополнительно к окислительному фосфорилированию включается гликолиз - это наиболее тяжелая мышечная работа - возникает "кислородный долг»;
- Это - работа "в смешанной зоне";

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- 3. Если мышечная работа максимальной интенсивности, но непродолжительная, то механизм окислительного фосфорилирования не успевает включаться;
- Работа идет исключительно за счет анаэробного гликолиза;
- После окончания максимальной нагрузки лактат поступает из крови в печень, где идут реакции глюконеогенеза, или лактат превращается в пируват, который дальше окисляется в митохондриях;
- Для окисления пирувата нужен кислород, поэтому после мышечной работы максимальной и субмаксимальной интенсивности потребление кислорода мышечными клетками повышено - возвращается кислородная задолженность (долг).

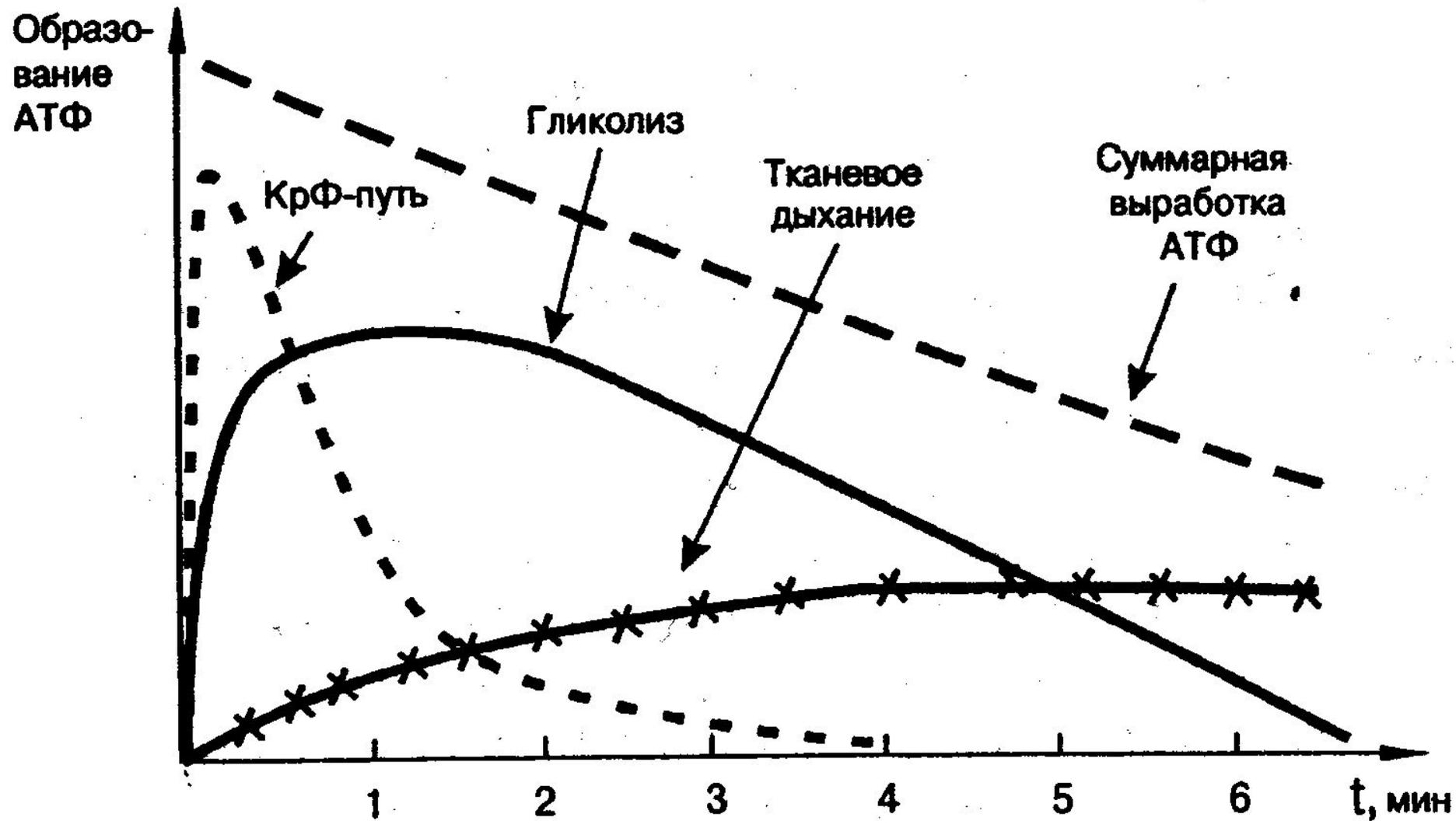


Рис. 19. Включение путей ресинтеза АТФ при выполнении физической работы

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- Таким образом, энергетическое обеспечение разных видов мышечной работы различно.
- Поэтому существует специализация мышц, причем обеспечение энергией у разных мышечных клеток принципиально различается: **есть "красные" мышцы и "белые" мышцы.**

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- **Красные мышцы** – «медленные», сильные, оксидативные мышцы.
- Они имеют хорошее кровоснабжение, много митохондрий, **высокая активность ферментов окислительного фосфорилирования.**
- **Предназначены для работы в аэробном режиме.**
- Такие мышцы служат для поддержания тела в определенном положении (позы, осанка).

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- **Белые мышцы** - "быстрые", ловкие, гликолитические.
- В них много гликогена, у них слабое кровоснабжение, высока активность ферментов гликолиза, креатинфосфокиназы, миокиназы.
- Они обеспечивают работу максимальной мощности, но кратковременную.

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- У человека нет специализированных мышц, но есть специализированные волокна: в мышцах-разгибателях больше "белых" волокон, в мышцах спины больше "красных" волокон.
- **Существует наследственная предрасположенность к мышечной работе** - у одних людей больше "быстрых" мышечных волокон - им рекомендуется заниматься теми видами спорта, где мышечная работа максимальной интенсивности, но кратковременная (тяжелая атлетика, бег на короткие дистанции и тому подобное). Люди, в мышцах которых больше "красных" ("медленных") мышечных волокон, наибольших успехов добиваются в тех видах спорта, где необходима длительная мышечная работа средней интенсивности, например, марафонский бег (дистанция 40 км). Для определения пригодности человека к определенному типу мышечных нагрузок используется пункционная биопсия мышц.
- В результате скоростных тренировок (bodybuilding) утолщаются миофибриллы, кровоснабжение возрастает, но непропорционально увеличению массы мышечных волокон, количество актина и миозина возрастает, увеличивается активность ферментов гликолиза и креатинфосфокиназы.
- Более полезны для организма тренировки "на выносливость". При этом мышечная масса не увеличивается, но увеличивается количество миоглобина, митохондрий и активность ферментов ГБФ-пути.