

Биофизика мышечного сокращения

Внешние механические проявления движения мышц –
телодвижения, кровообращение, дыхание
и прочие макродвижения

Сокращение мышц (изменение размера) обусловлено
наличием в них
сократительного комплекса – актомиозина

Проблемы:

Микропроявления? – активный транспорт
веществ через клеточные мембраны

Преобразование химической энергии в механическую

Инженерная схема: ХЭ → ТЭ → ПромежМЭ → ЭЭ → МЭ

Схема организма: ХЭ → МЭ

Сокращение мышцы

Активное действие:

совершение работы

Пассивное действие:

сократительное действие

возникновение напряжения
в сечении мышцы

Крайние случаи сокращения мышц:

Изометрические

неизменная длина мышц

Изотонические

неизменное напряжение

мышц

Абсолютная мышечная сила:

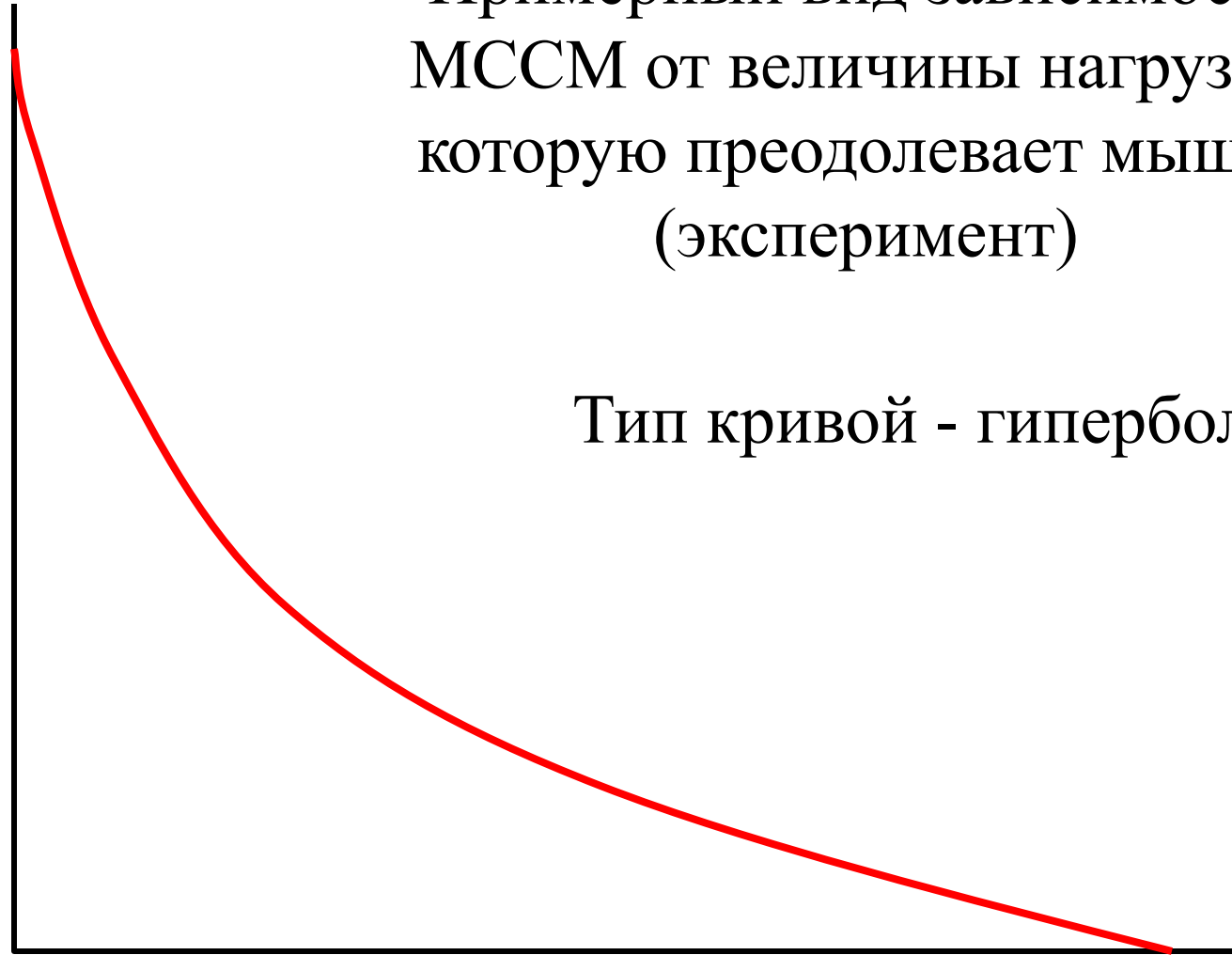
Отношение максимального веса груза, который может поднять мышца к ее физиологическому сечению

Скелетная мышца – 10^6 Па, гладкая – 10^5 Па

Зависимость между силой, развиваемой мышцей
при сокращении, от скорости сокращения (укорочения)
мышцы:

(основное уравнение сокращения мышцы)

Максимальная скорость сокращения
мышцы (МССМ)



Примерный вид зависимости
МССМ от величины нагрузки,
которую преодолевает мышца
(эксперимент)

Тип кривой - гипербола

Сила, преодолеваемая мышцей

Основное уравнение сокращения мышцы Хилла:

$$(F + a)(v + b) = \text{const}$$

Интерпретация:

Байер: $F'v' = \text{const}$

$P_0 = Fv'$ – общая мощность мышцы при сокращении

$P = Fv$ – реальная мощность мышцы

$$P \ll P_0$$

Интерпретация:

энергия на сокращение:

внешняя работа

внутренняя работа
(тепловое рассеяние)

Энергетический баланс:

Сокращение мышцы = механическое (внешнее)
сокращение + теплообразование

Преобразование энергии в организме =
= механическая + тепловая

Организм = теплоэнергоцентрль

Разумная энергетическая теория:

Хилл: при каждом раздражении выделяется постоянная теплота Q_A активации (не зависит от нагрузки?):

$$Q_A = const$$

Теплота сокращения Q_C :

$$Q_C = k\Delta l$$

Зависит от сокращения мышц Δl и не зависит от нагрузки

К.п.д. мышечного сокращения:

$$\eta = \frac{F \Delta l}{\text{полезное}} \\ \text{затраченное} \\ Q_A + (Q_C = k \Delta l) + F \Delta l$$

$$\eta = \frac{F \Delta l}{Q_A + k \Delta l + F \Delta l}$$

Данные Хилла:

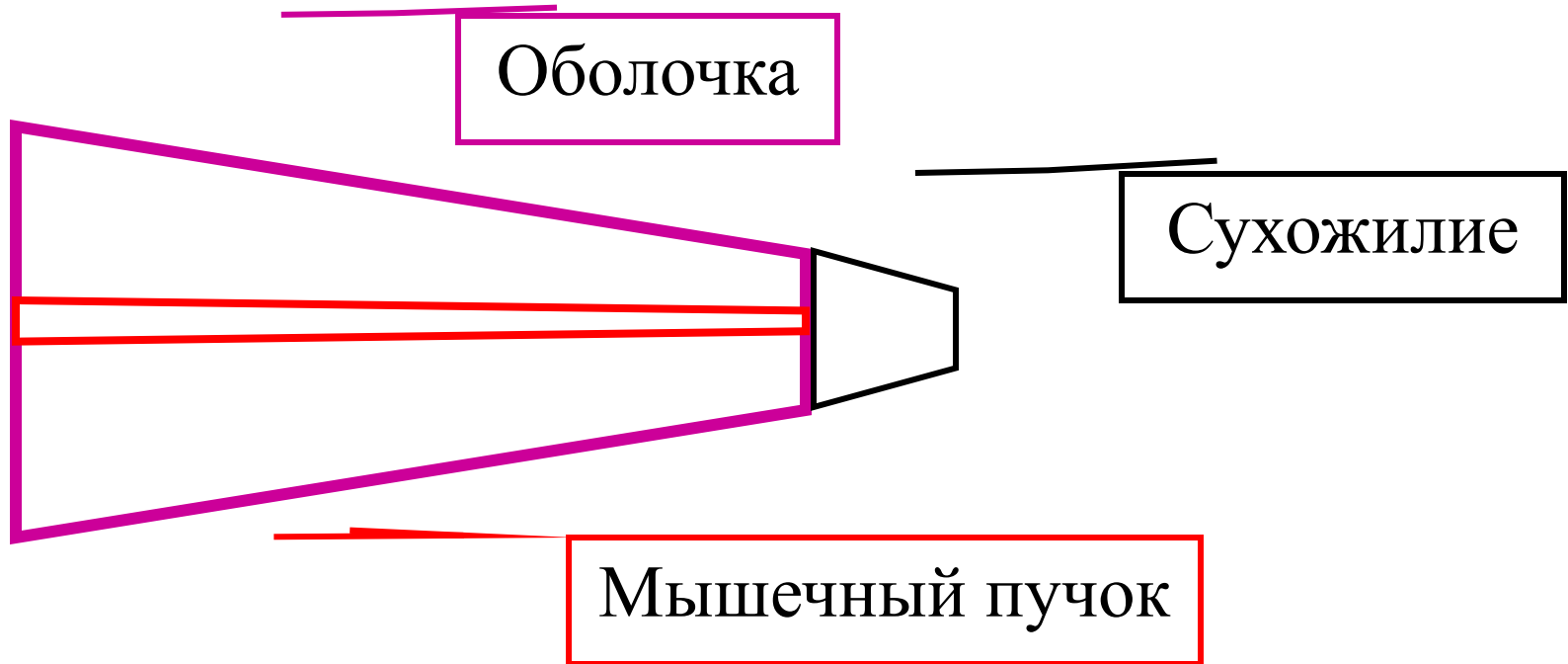
$$\eta(\text{АТФ} \rightarrow \text{Мех.Энергия}) \approx 0,4$$

$$\eta(\text{Пит.Веществ} \rightarrow \text{АТФ}) = 0,5$$

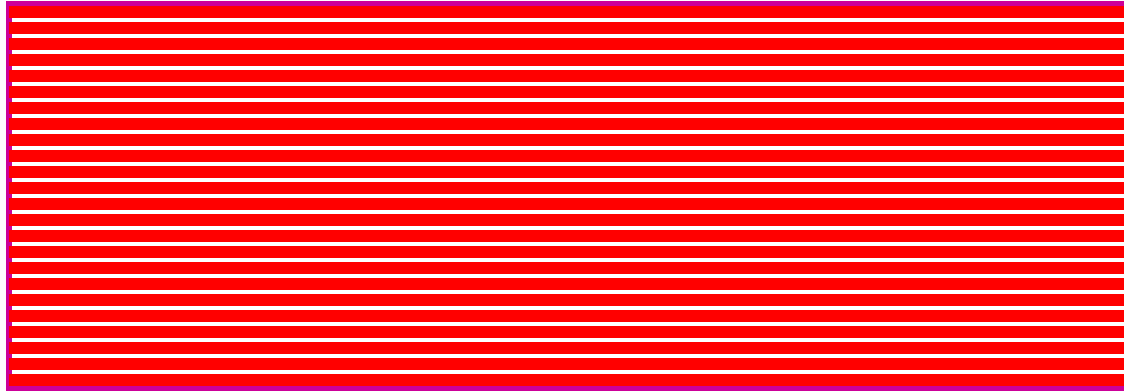
Суммарный к.п.д. превращения энергии ПП→М :

$$\eta = \eta(\text{ПВ} \rightarrow \text{АТФ}) \cdot \eta(\text{АТФ} \rightarrow \text{МЭ}) = 0,2$$

Структура мышц

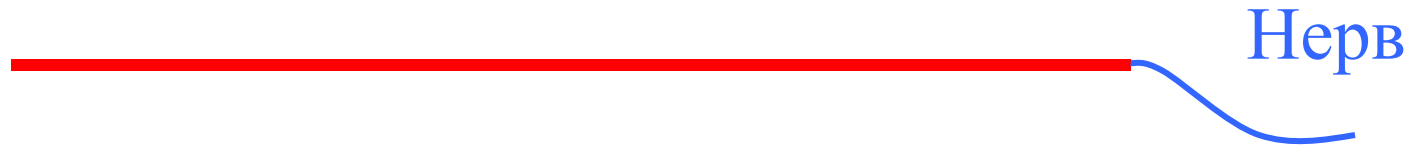


Мышечный пучок



Несколько тысяч параллельных мышечных
волокон $d = 10 - 100$ мкм

Отдельное мышечное волокно



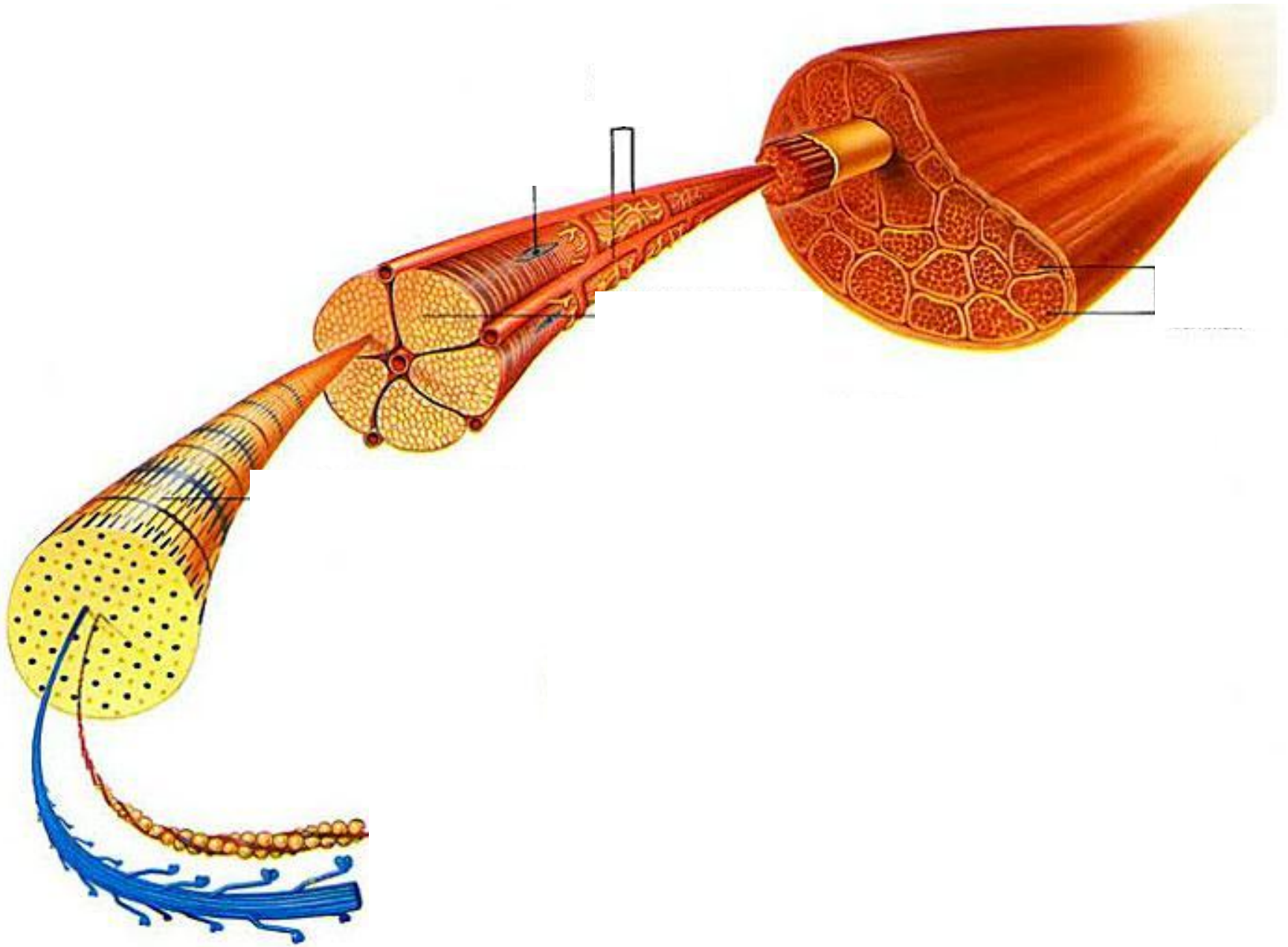
Мембрана волокна –
плазмалемма $h \approx 10$ нм

$\Delta\varphi \approx 100$ мВ



Слой коллагеновых нитей

1000 – 2000 || миофибрилл $d \approx 1$ мкм



Оптическая микроскопия: поперечная полосатость волокон

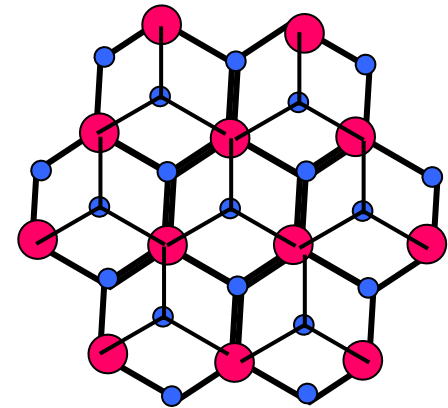
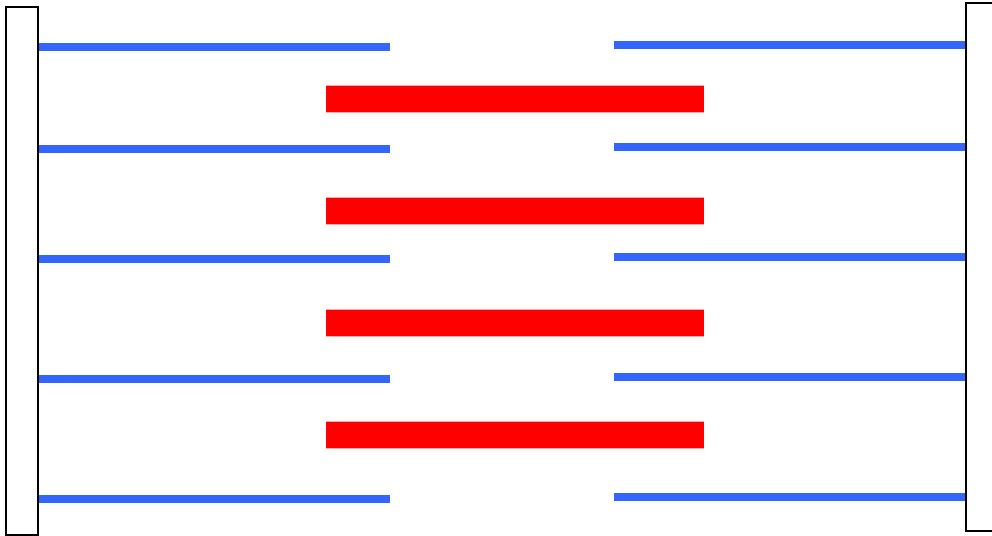


Обусловлена поперечной полосатостью миофибрилл, образующих внутри волокна упорядоченную структуру

Электронная микроскопия и РСА: отдельная миофибрилла

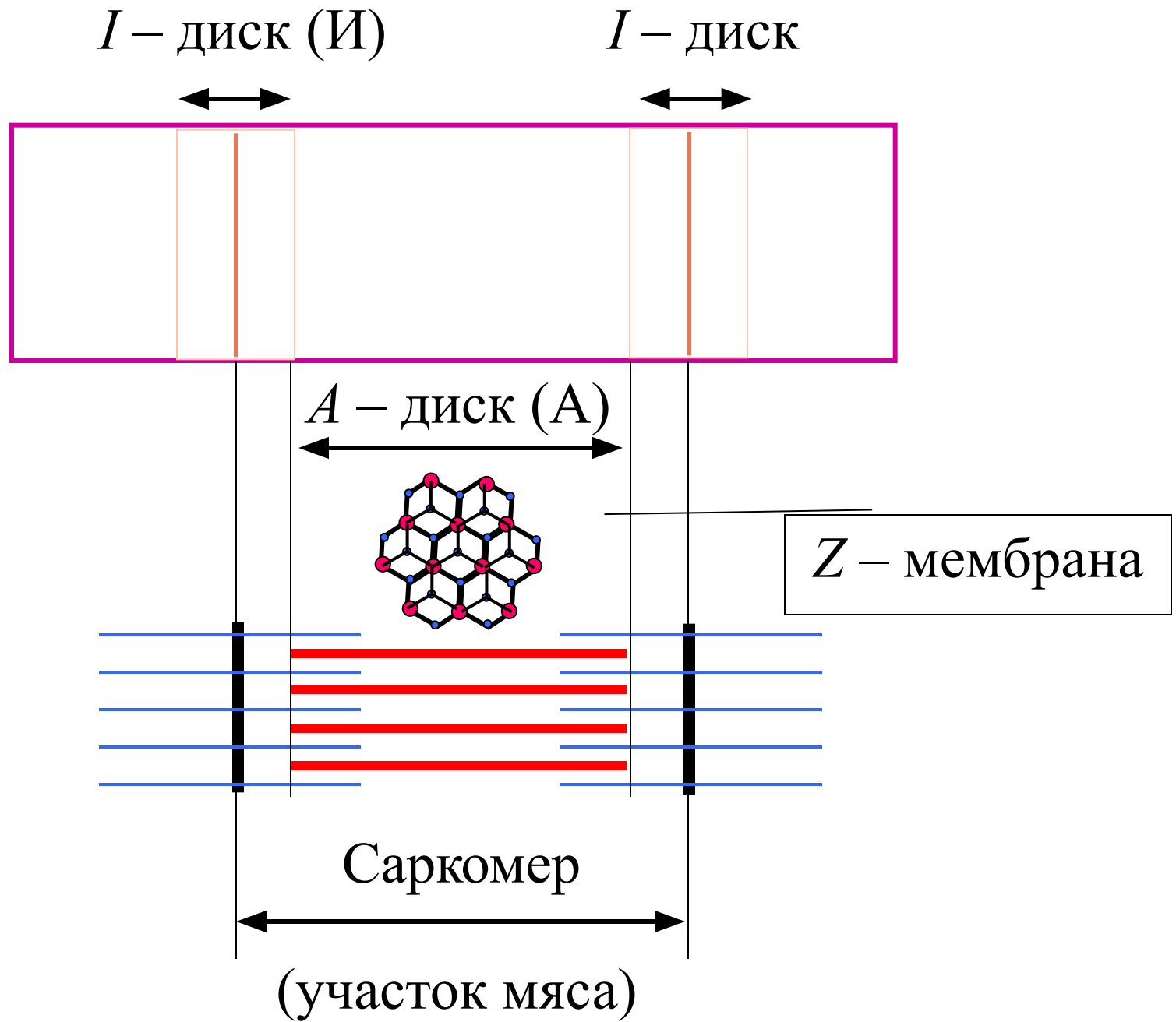
Тонкие актиновые протофибриллы

$$l_A \approx 1 \text{ мкм}, d \approx 5 - 7 \text{ нм}$$



Толстые миозиновые протофибриллы

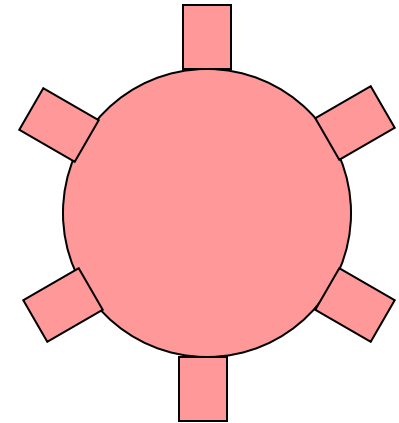
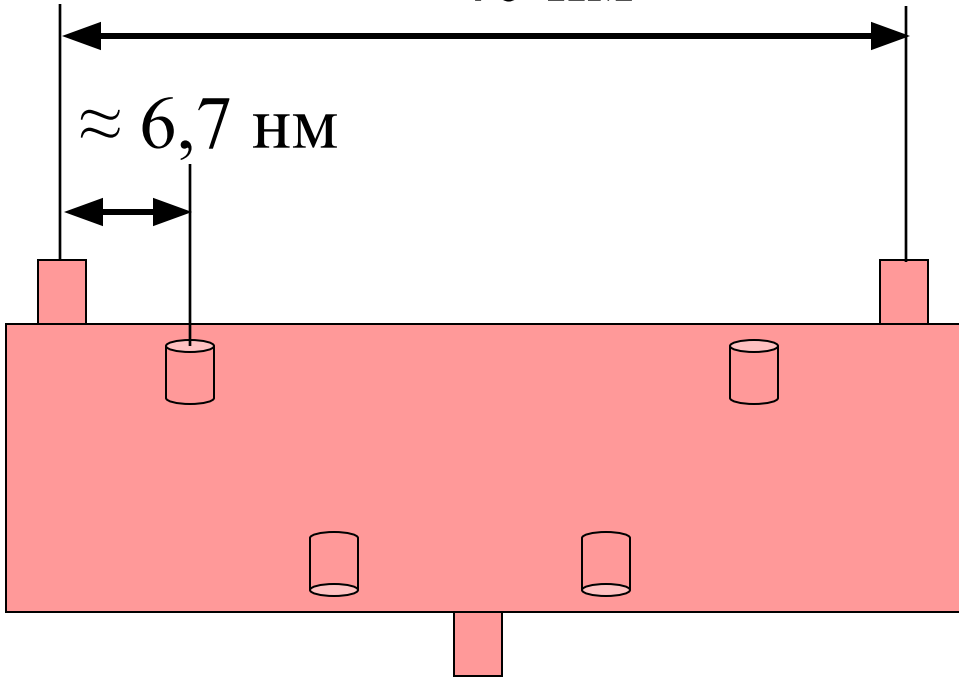
$$l_M \approx 1,5 \text{ мкм}, d \approx 16 \text{ нм}$$



Каждая миозиновая нить соединена мостиками с 6-тью соседними актиновыми нитями:

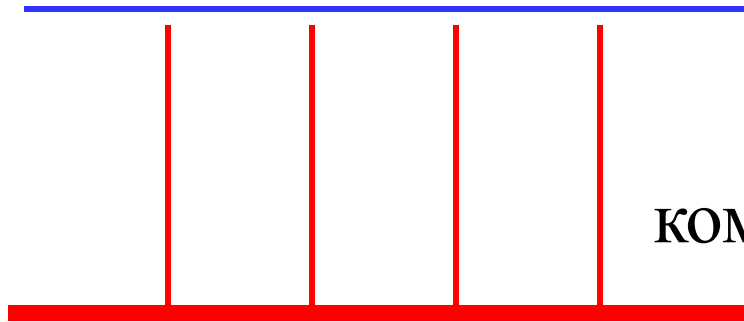
≈ 40 нм

$\approx 6,7$ нм



Ферментативные свойства актомиозина

актин



= актомиозиновый
комплекс (фермент АМ)

МИОЗИН =

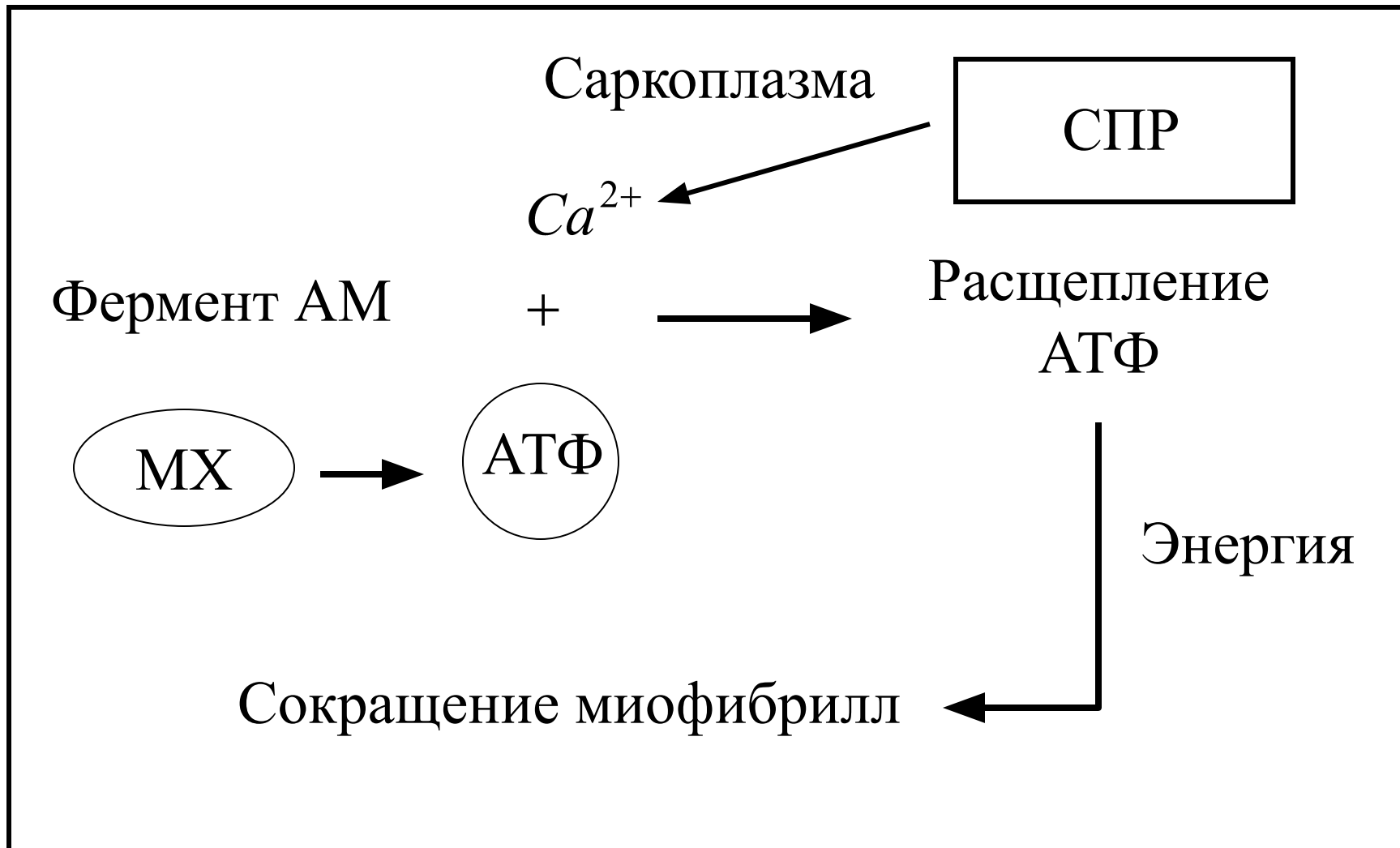
= сократительные + ферментативные свойства:
гидролиз АТФ → энергия на сокращение

Ферментативная активность (ФА)
определяет способность к сокращению миофибрилл:

$$\frac{\Phi A_{AM}}{\Phi A_M} \approx 10$$

$$\Phi A_{AM} = f(C_{Ca^{2+}})$$

Кальциевый насос определяет сокращение и расслабление миофибрилл:



Локализация насоса – саркоплазматический ретикулум (СПР)

Деполяризация мембран СПР



Освобождение Ca^{2+} (СПР → саркоплазма)



↑ ΦA_{AM}



Расщепление АТФ



Сокращение миофибрилл

Из саркоплазмы Ca^{2+}



СПР



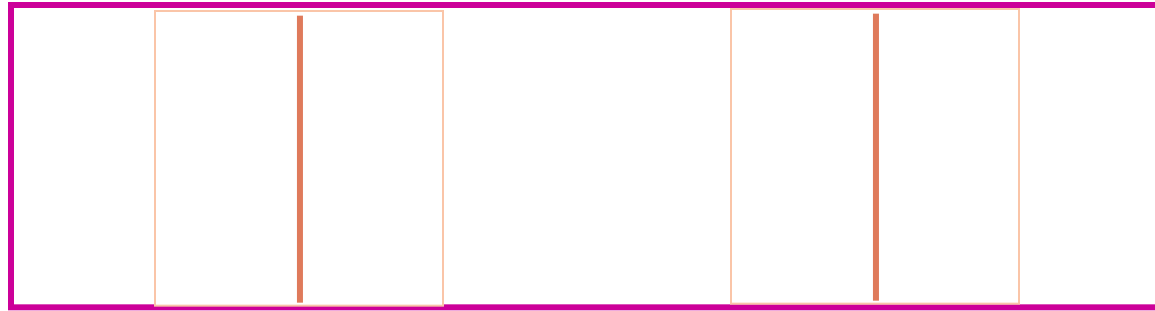
Расслабление миофибрилл

Механизм мышечного сокращения.

Теория скольжения нитей

Предпосылки:

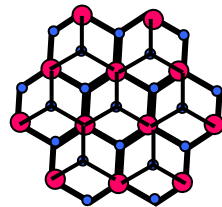
1. В широком диапазоне деформаций ширина A -диска постоянна



A – диск (A)

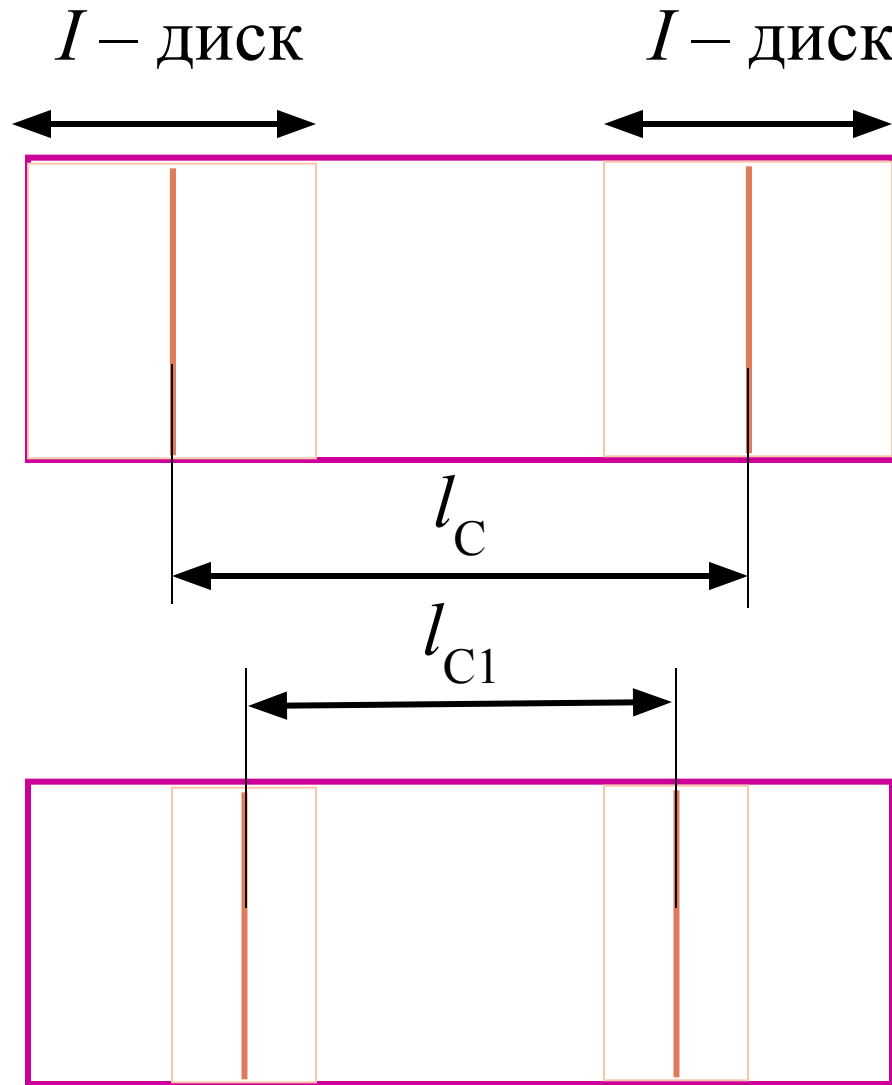


$\rightarrow l_M = \text{const}$

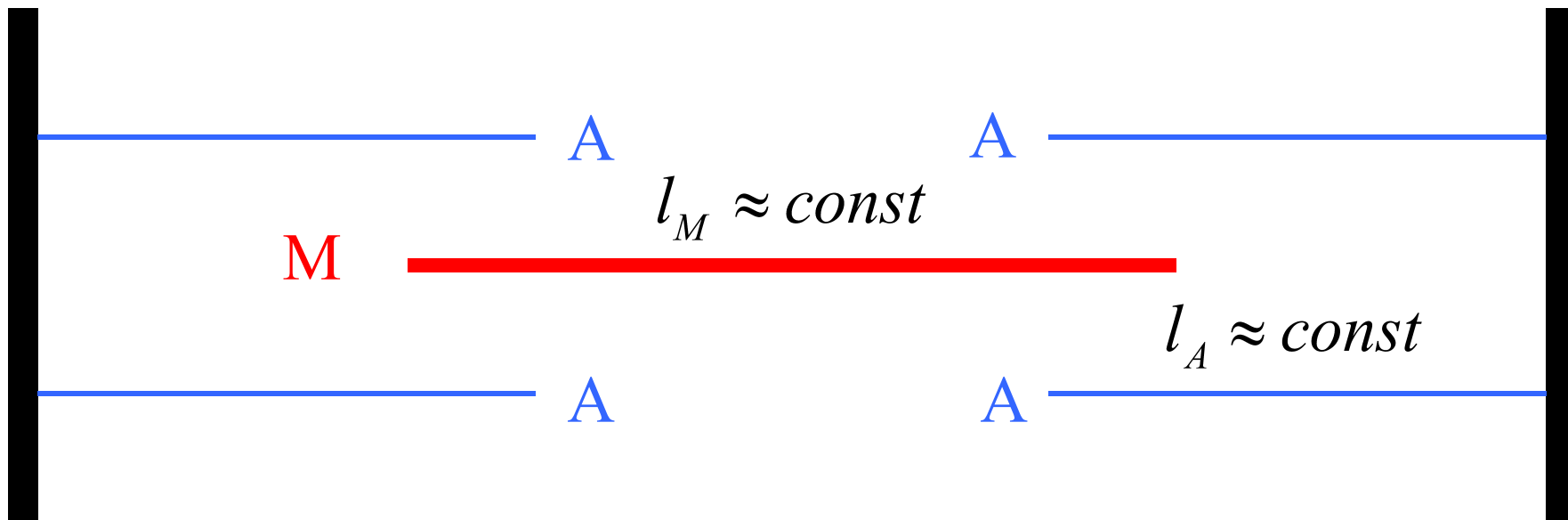


упорядоченная
структура

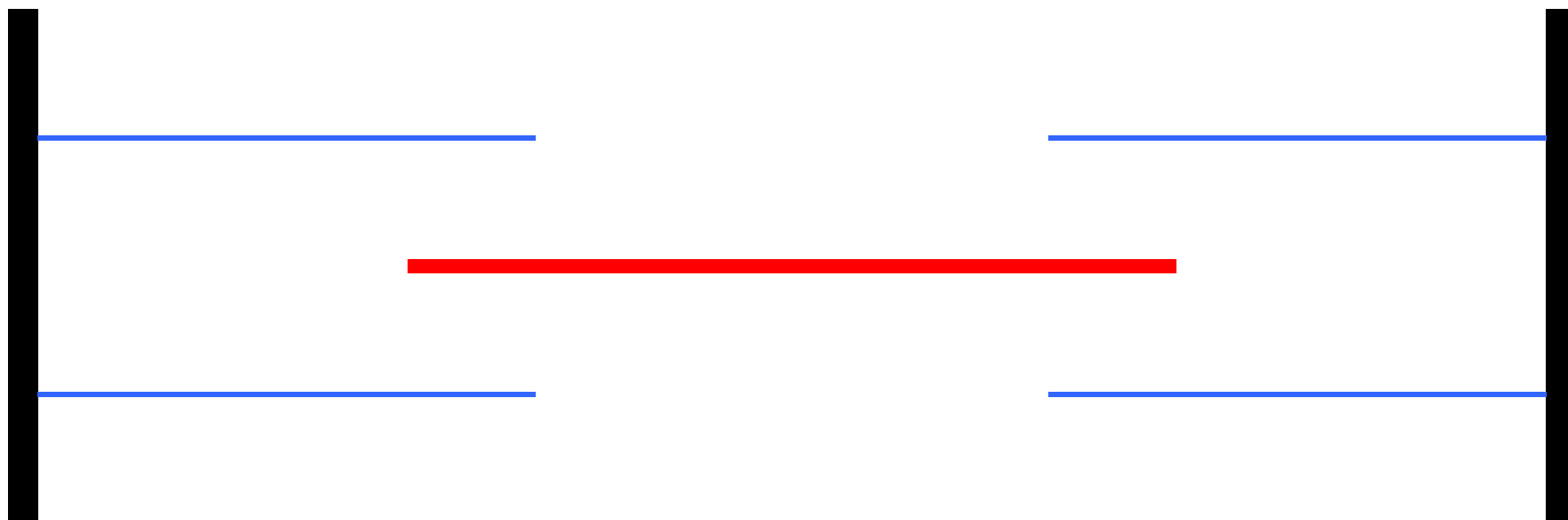
2. При изменении длины саркомера изменяется ширина I -диска (актиновые нити)



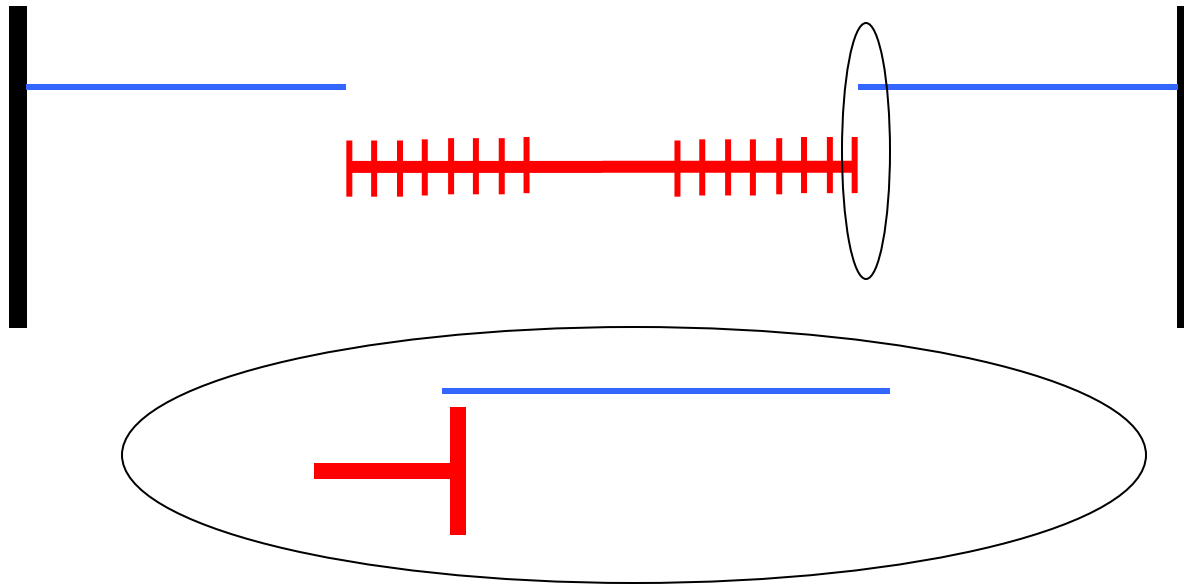
3. В большой области деформаций длины миозиновых и актиновых нитей постоянны
4. При сокращении мышцы нити скользят друг относительно друга без изменения длины

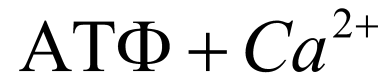
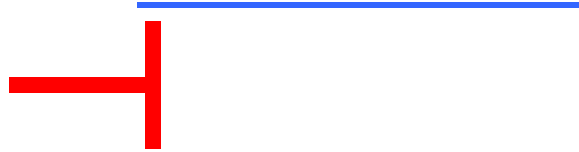


Сокращение мышцы (сокращение саркомера)



Перемещение тонких нитей относительно толстых происходит при помощи мостиков, соединяющих миозиновые нити с актиновыми



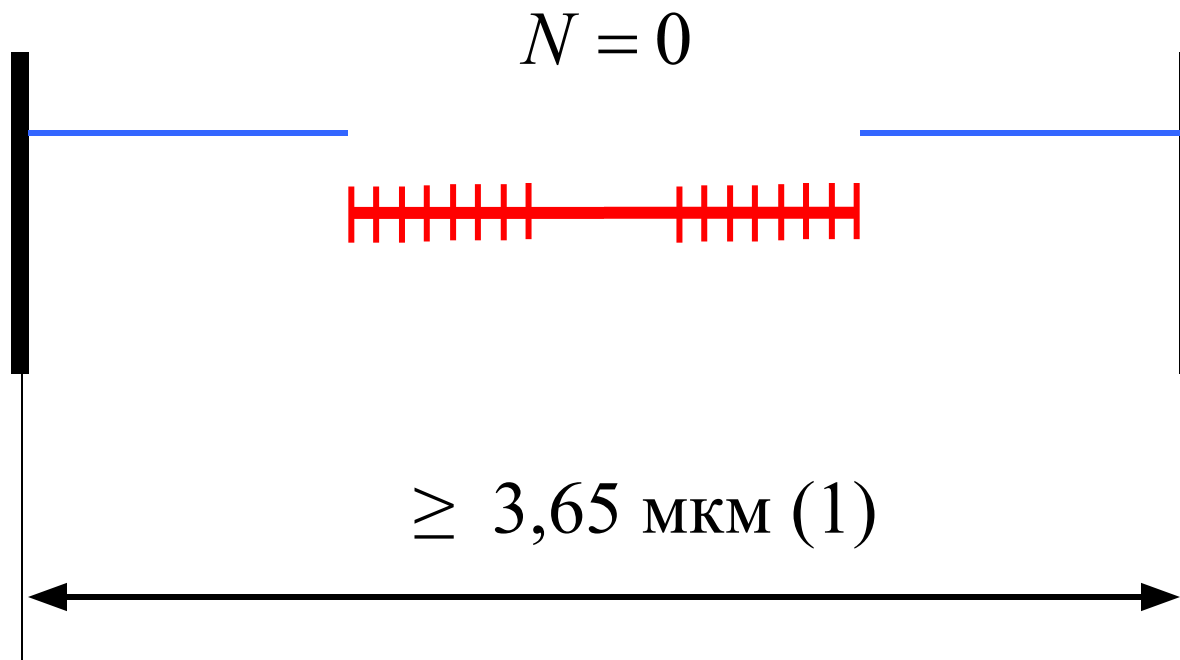


Гидролиз ATP = АДФ + фосфатный остаток →

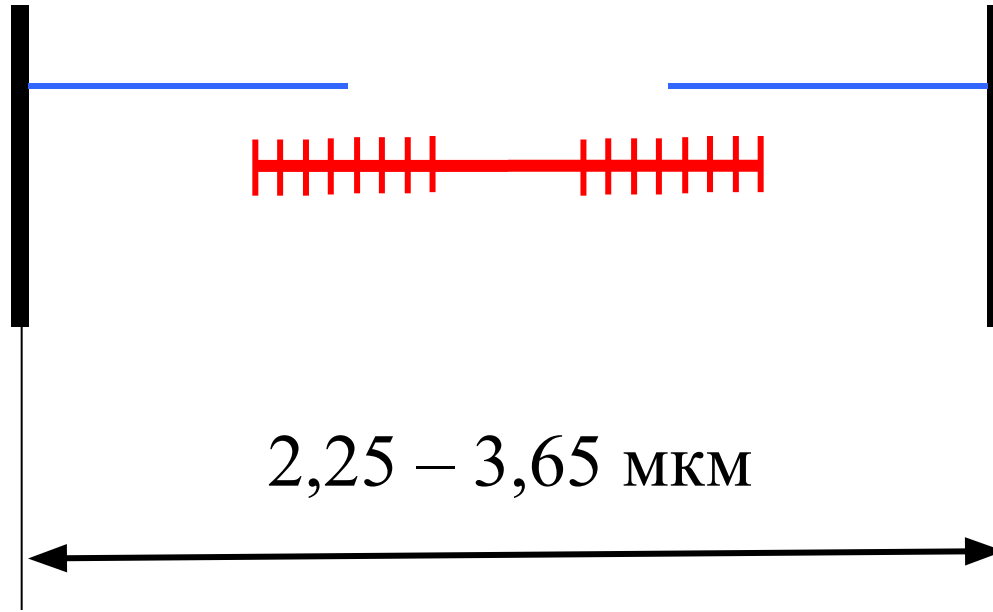
→ механическая энергия

Перекрывание миозиновых и актиновых нитей при различных длинах саркомера

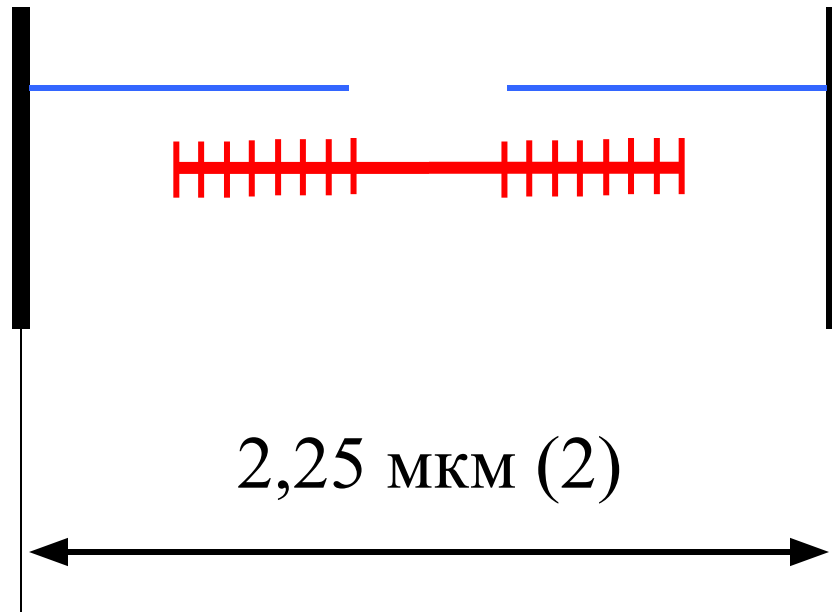
N – количество мостиков в перекрытии нитей



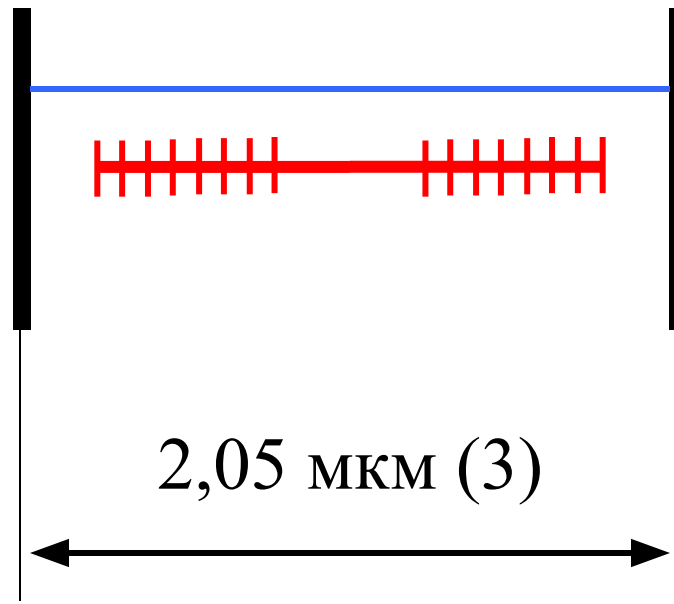
$N \uparrow$



$$N = N_{\max}$$

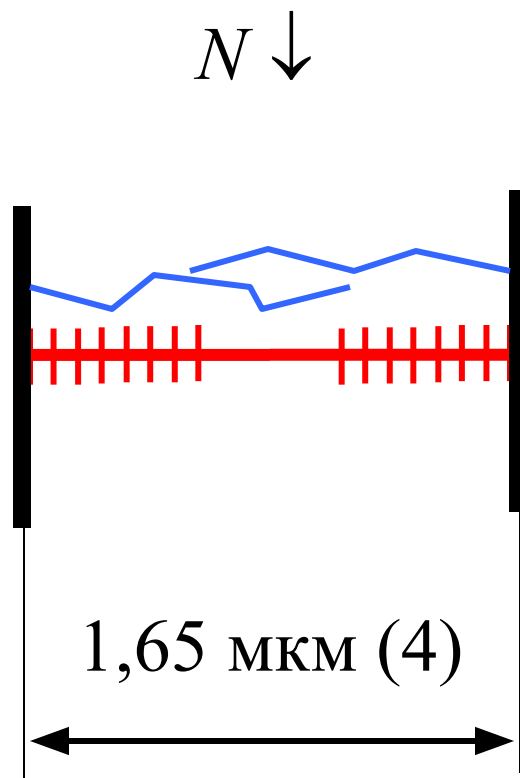


$$N = N_{\max}$$



Максимальное перекрытие без деформации нитей
(смыкание актиновых нитей)

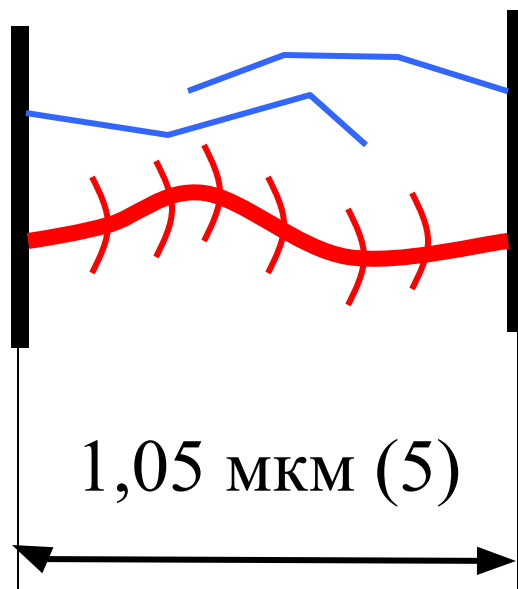
Деформация актиновых нитей после их смыкания



Начало
деформации
МОСТИКОВ

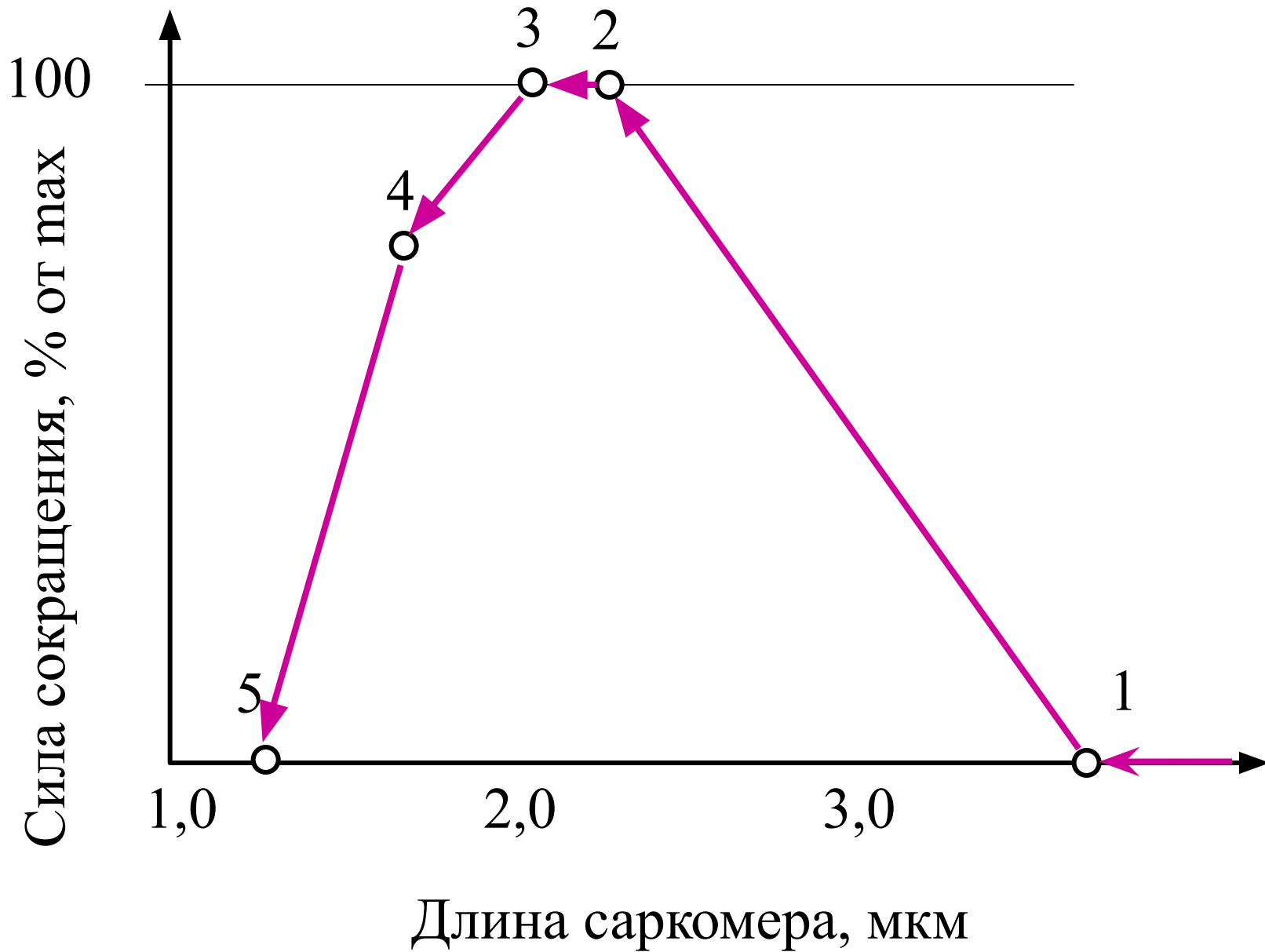
Деформация миозиновых нитей

$$N \rightarrow 0$$



Разумное предположение: количество актино —
миозиновых мостиков пропорционально
развиваемому мышечному усилию

$$F_{\text{СОКР.}} = f(N)$$

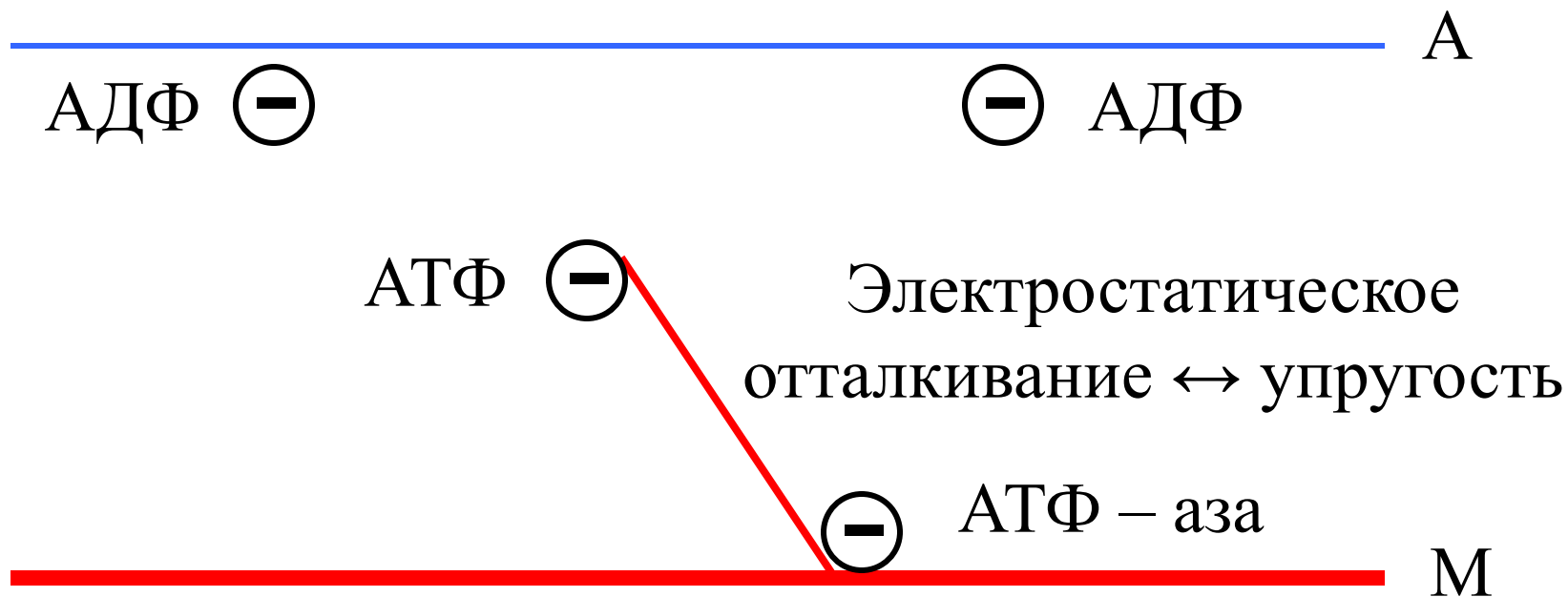


Самостоятельно на графике указать:

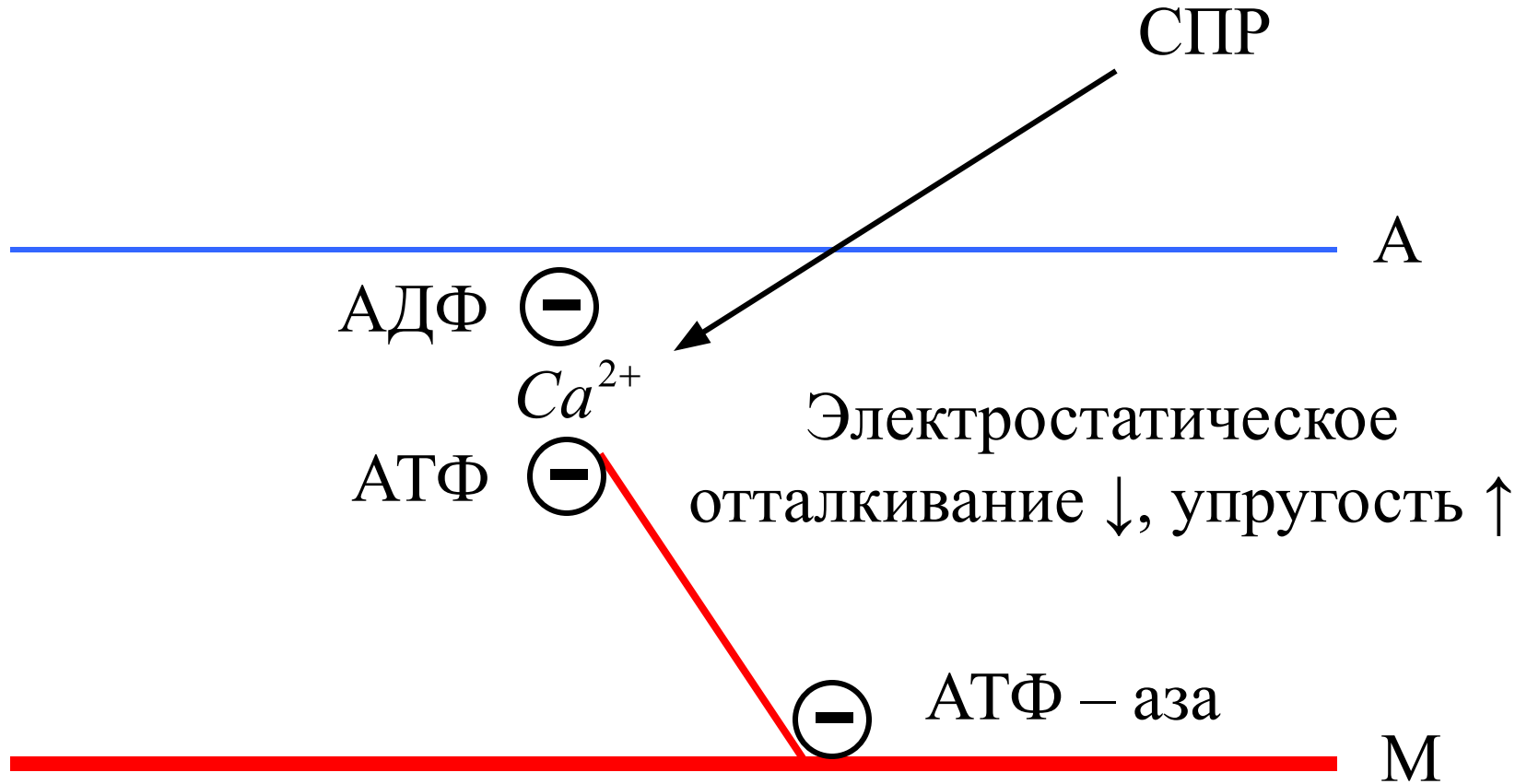
1. Длины саркомера, соответствующие точкам 1,2,3,4,5
2. Тенденции изменения N на участках 1 – 2,
2 – 3, 3 – 4, 4 – 5

Гипотеза Дэвиса о механизме взаимодействия миозиновых и актиновых нитей

1. Состояние покоя:



2. Образование связи:

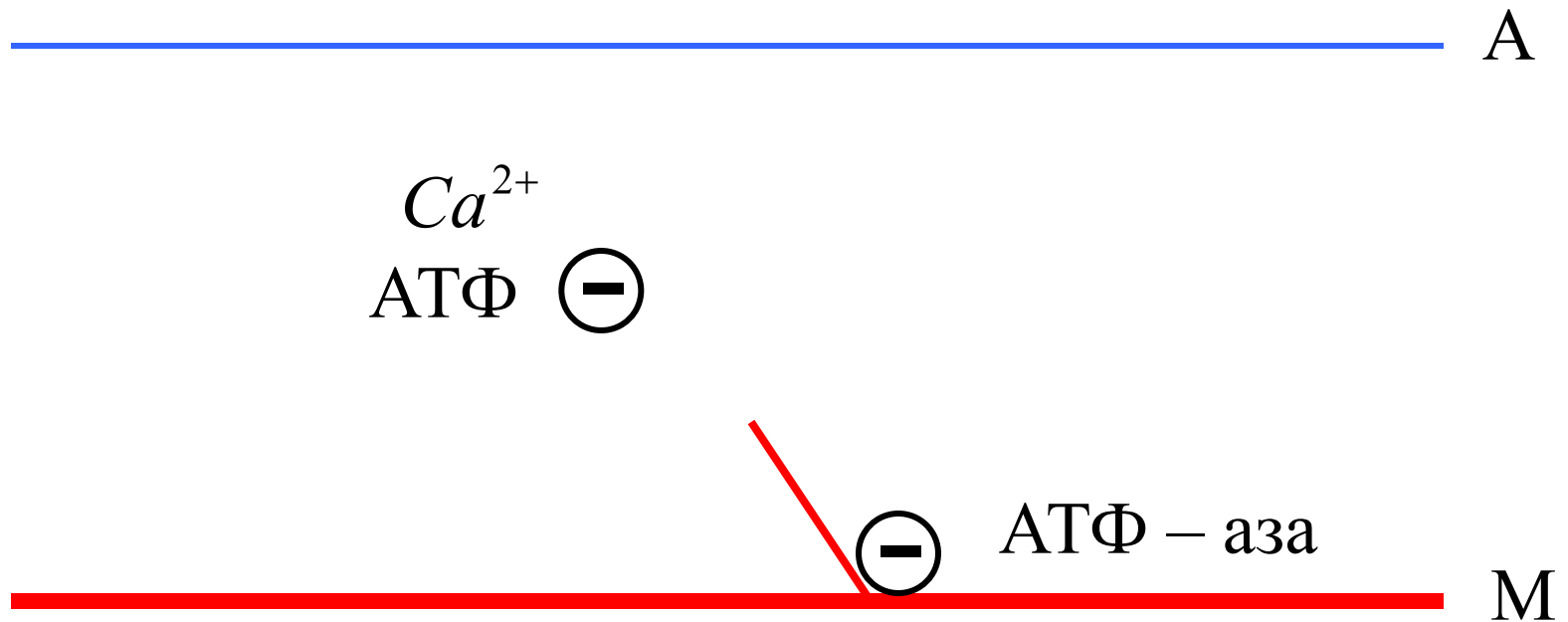


3. Сокращение мостика:

3.1. Высвобождение потенциальной энергии мостика

3.2. Перемещение актиновой нити на один шаг

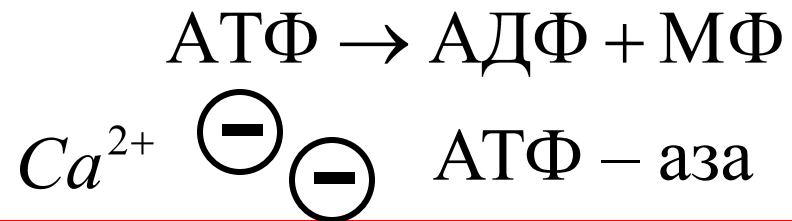
3.3. Доставка АТФ к АТФ – азе.



4. Гидролиз АТФ

Разрыв связи между А и М

А



М

5. Присоединение АТФ

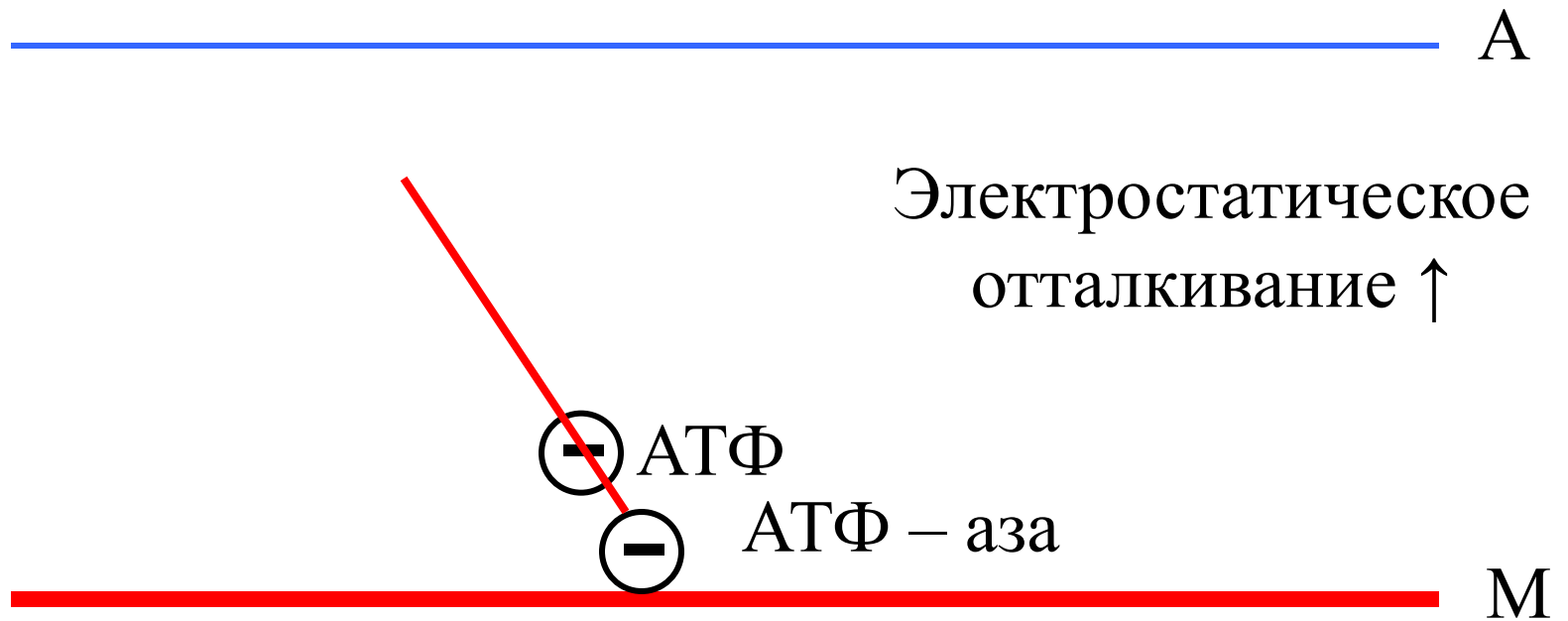
⊖ АТФ Саркоплазма (МХ)

_____ А

⊖ АТФ – аза

_____ М

6. Вытягивание мостика



Выводы:

1. Мышцы обладают как пассивными, так и активными механическими свойствами
2. Активные механические свойства обусловлены наличием в мышцах актино – миозинового комплекса
3. В мышцах осуществляется уникальное преобразование химической энергии в механическую
4. Механизм мышечного сокращения объясняется теорией скольжения нитей

Структура мышц

