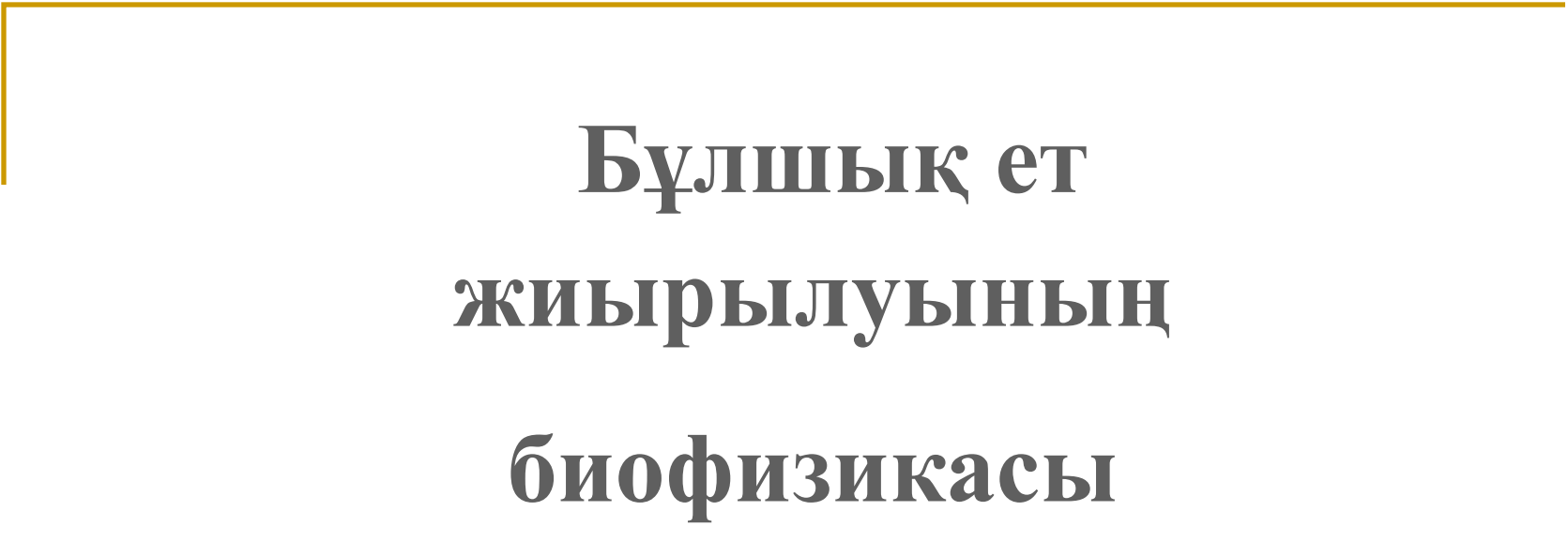


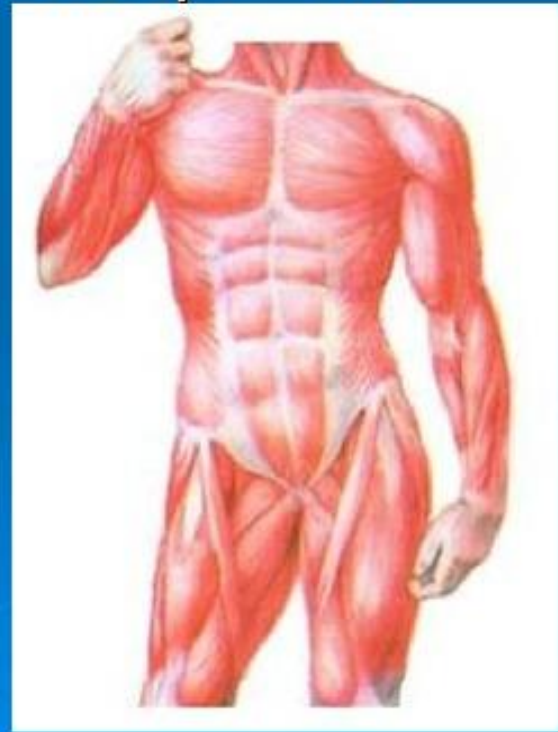


Бұлшық ет жиырылуының биофизикасы

Сұрақтары

- Бұлшық ет құрылысы
- Бұлшықет биомеханикасы
- Хилл теңдеуі
- Бұлшықет жиырылуының моделденуі

- Бұлшық ет – адамда, омыртқалы жануарларда және көптеген омыртқасыздарда денені қозғалысқа келтіретін мүше. Оның негізін бұлшық ет талшықтары құрайды.

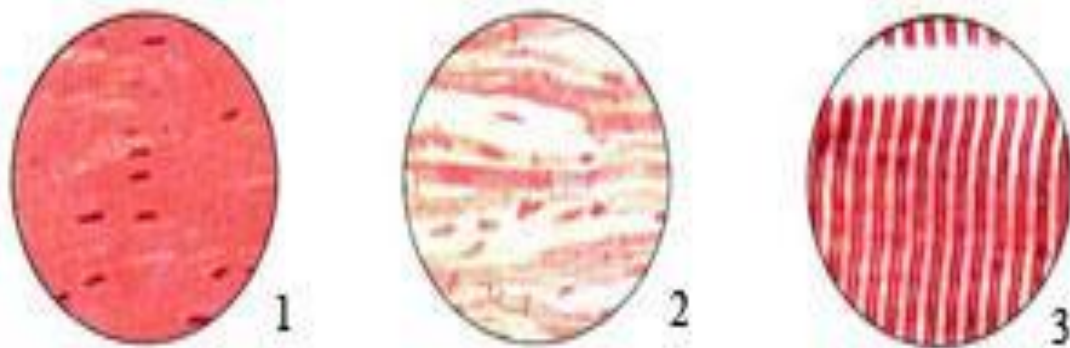


Адам ағзасында 600-ден аса бұлшық ет бар. Олар құрылысы, пішіні, қасиеттері мен қызметі жағынан әртүрлі.

Адамның бұлшық еттері құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты 3 түрге бөлінеді:

- 1.Қаңқа (көлденең жолақты) бұлшық ет ұлпасы;
- 2.Жүректің көлденең жолақты бұлшық ет ұлпасы;
- 3.Бірыңғай салалы бұлшық ет ұлпасы.

- Қаңқа бұлшық еттері тірек-қимыл аппаратының белсенді элементтері болып табылады. Көлеміне келетін болсақ, адам ағзасындағы ең үлкен ұлпаны құрайды. Олардың жасушаларында (талшықтарында) көптеген ядролары болады және жасушаларының ұзындықтары 10 сантиметрден асуы мүмкін.



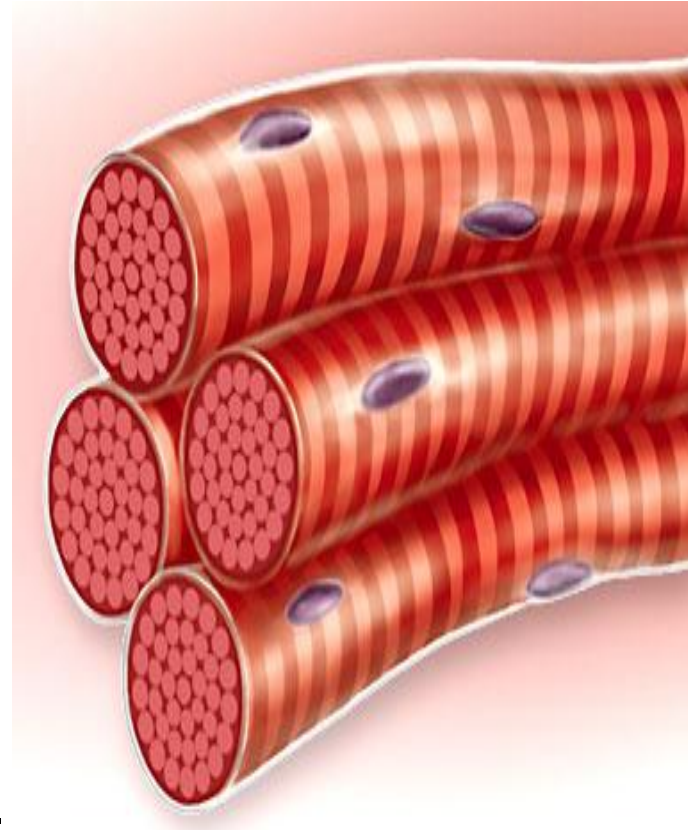
Бұлшықет ұлпалары:

1 – өңештің бірыңғай салалы бұлшықеттері; 2 –жүрек бұлшықеттері;
3 – қаңқа бұлшықеттері

Қаңқа бұлшықетіне тұлға, бас, мойын және иық, жамбас белдеулер мен қол-аяқ бұлшықеттері жатады

Бірыңғай салалы бұлшықеттер ішкі мүшелердің ішкі жағын (ішек, асқазан, қантамырлар, қуық, бездердің өзектері) астарлап жатады. Жиырылғанда ішкі мүшелердің көлемін өзгертеді. Олардың жиырылуы баяу әрі ырғақты және адамның еркінен тыс жүзеге асады.

- Бұл серпімді, иілгіш ұлпа адамның және жануарлардың қаңқа бұлшықетін түзеді. Ол әртүрлі қозғалыстарды жүзеге асыруға арналған: дене қозғалысы, дауыс желбезегінің жиырылуы, тыныс алу. Мұндай бұлшықеттер адамның өз қалауы бойынша, ерікті түрде жиырыла алады және қаңқамен бірігіп, тірек-қимыл жүйесін құрайды. Қаңқа элементтерін қозғалысқа әкелетін қаңқа бұлшықеттері көлденең жолақты бұлшықет ұлпаларына жатады. Ұлпаның мұндай атауы шамамен белгілі-бір ретпен орналасқан, ақ және қара жолақтардың кезектесуінен туындаған. Қаңқа бұлшықеттері өте жылдам жиырылады және тез шаршайды. Бұндай бұлшықеттердің жұмысы біздің санамызбен басқарылады.

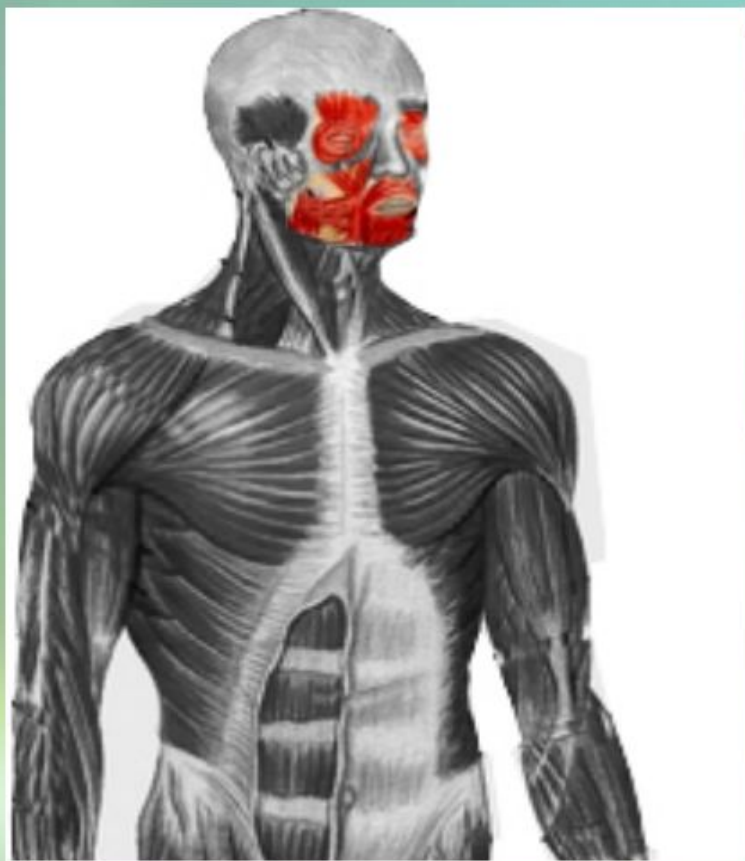


Бұлшық еттер сіңір арқылы сүйек ойысына, төмпешігіне бекиді және ағзаны қозғалысқа келтіреді. Бұлшық еттерде көптеген қан тамырлары болады, сол арқылы бұлшық еттер қоректік заттармен және оттегімен қамтамасыз етіледі және зат алмасу өнімдері – тіршілік әрекетінің зиянды заттары сыртқа шығарылады.

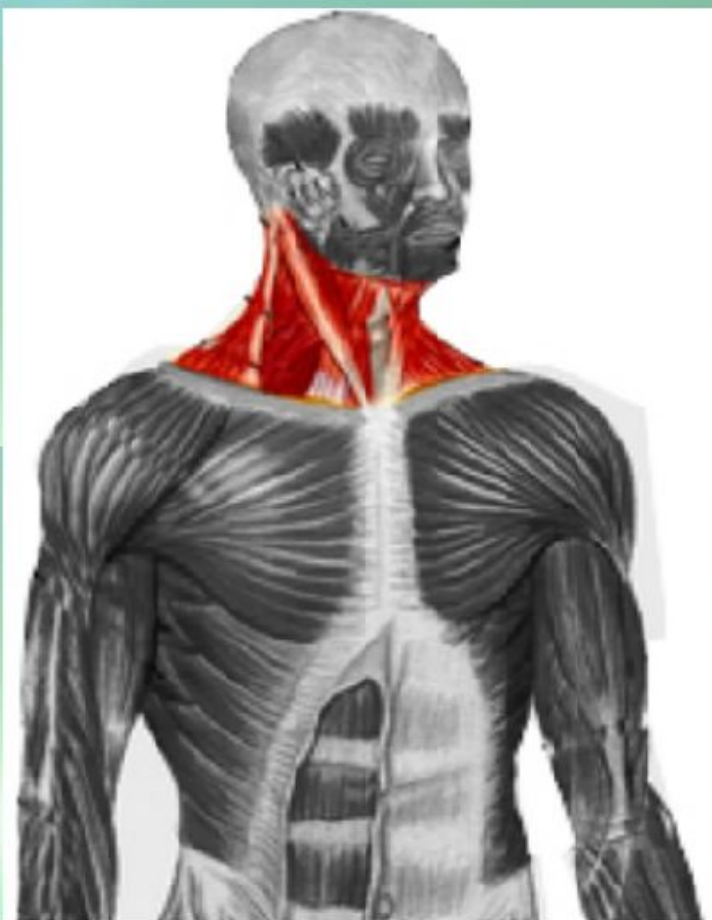
Қол бұлшық еттері



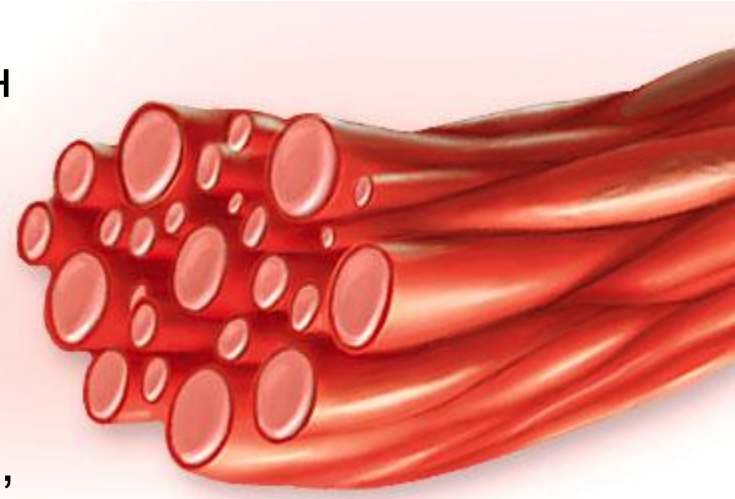
Бас бұлшық еттері



Мойын бұлшық еттері



Бұлшықеттің үшінші түрі – бірыңғай салалы бұлшықет. Бірыңғай салалы бұлшықет ішкі мүшелер: қан және лимфа тамырлары, несеппағар түтігі, асқорыту жолы (асқазан мен ішек қабырғалары) қуысын астарлап жатады. Бірыңғай салалы бұлшықет жасушалары бұлшықеттің басқа түрлерінен құрылысы мен қызметі жағынан ерекшеленеді. Бірыңғай салалы бұлшықет бір ядролы салыстырмалы түрде ұсақ бұлшықет жасушаларынан – ұршық тәрізді миоциттерден тұрады. Олардың баяу және ұзақ жиырылуы еріксіз, яғни адам қалауына байланыссыз жүреді.

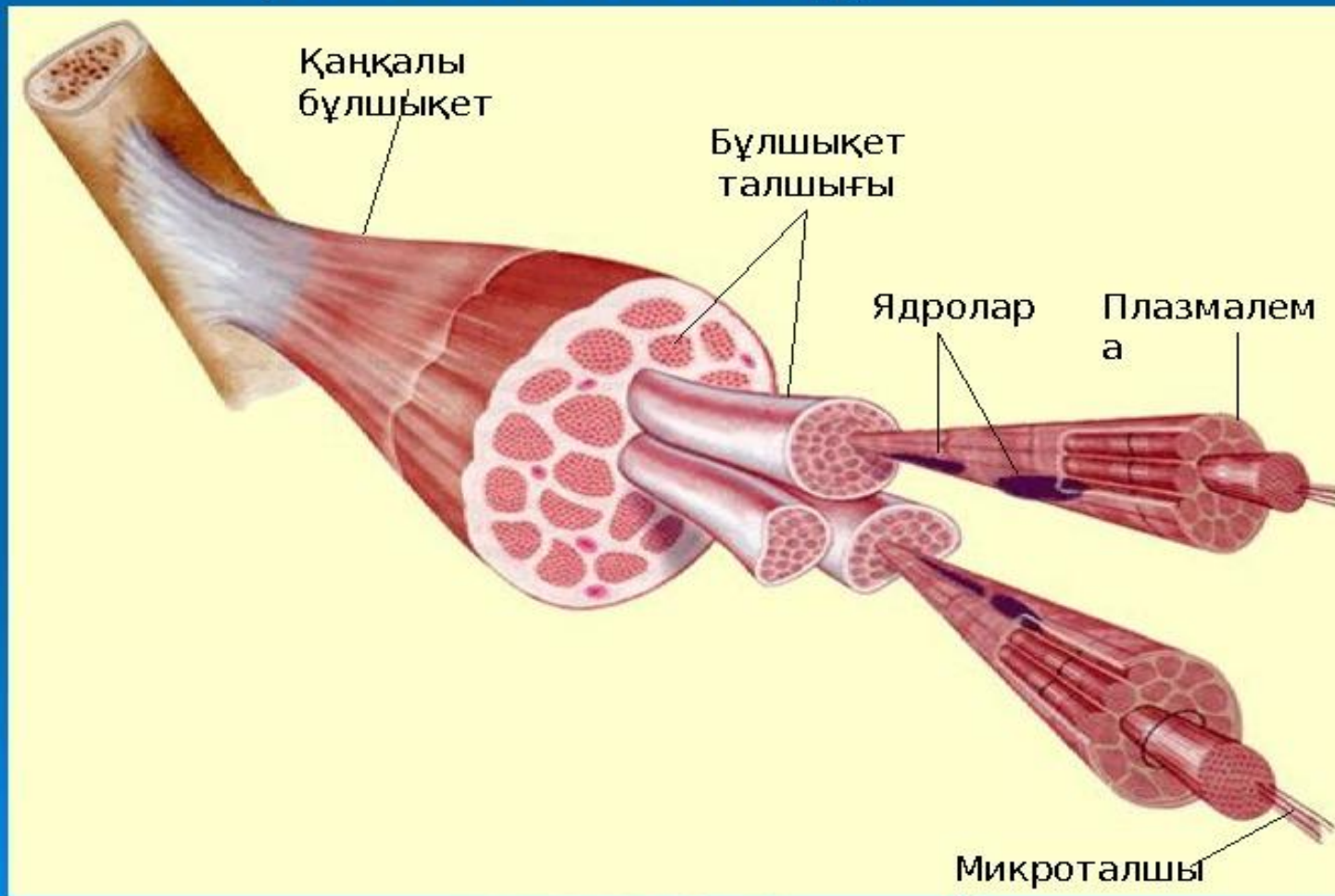


- Бұлшықеттер адам ағзасындағы әр түрлі қозғалыстарды қамтамасыз ететін тірек-қимыл жүйесінің белсенді бөлігі. Бұлшықеттің қатысуымен адам кеңістікте қозғалып, дененің тепе-теңдігін сақтайды. Кеуде қуысын құрайтын қабырғалардың арасындағы бұлшықеттер мен көкет (кеуде мен құрсақ қуысын бөліп тұратын ет) тыныс алу қозғалысына қатысады. Жұтыну, дауыстың шығуы, көздің қозғалуы, ішкі мүшелер жұмыстарының барлығы бұлшықеттердің жиырылу, босаңсу әсерінен болады. Сүйектермен бірлесіп денеге пішін беріп, денені тік ұстауға көмектеседі

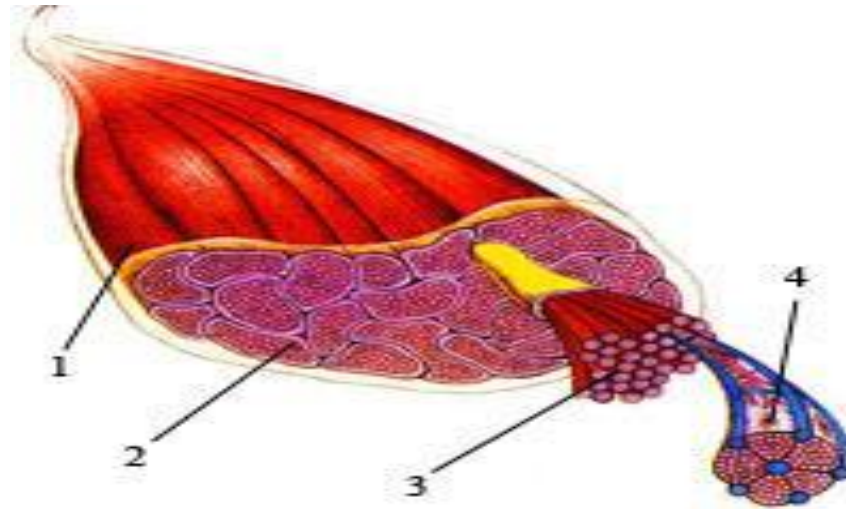
- Бұлшқеттердің құрылымдық элементі — *бұлшықет талшығы*. Бұлшықет талшығы көпядролы, диаметрі 10-нан 100-ге дейін мкм құрайтын клетка. Осы клетка сарколемма деп аталатын қабықшамен қапталған, сарколемма саркоплазмамен толтырылған. Саркоплазмада миофибриллдер орналасқан. Миофибрилла — саркомерлерден тұратын жіп тәрізді түзіліс. Миофибриллдердің санына қарай ақ және қызыл бұлшықет талшықтары болады.
- Ақ бұлшықет талшықтарында миофибриллдер көп болады, ал саркоплазма аз, соған байланысты тез жиырыла алады.
- Қызыл бұлшықет талшықтарында миоглобиннің саны көп болады.
- Сонымен қатар саркоплазмада миофибриллдерден басқа митохондриялар, рибосомалар, Гольджи жиынтығы және басқа да органелалар болады. Сарколемманың құрамына қалың миозинді жіпшелер және жұқа актинді жіпшелер кіреді.

- Актин — жиырылғыш белок, 375 аминқышқылдарынан тұрады және бұлшықет белогының 15% құрайды. Жарық микроскоппен қарағанда актин молекулалары жарық жолақ түрінде көрінеді (I-дискі деп аталады). Актин басқа белоктармен қосылып актин талшығы жиырылу қабілетіне ие болады.
- Миозин — негізгі бұлшықет белогы, бұлшықеттегі құрамы 65 % жетеді Миозин молекуласы екі полипептидті тізбектерден тұрады, әр тізбек 2000 сминоқышқылдардан тұрады. Микроскоппен қарағанда миозин молекулалары қара жолақ түрінде көрініс береді (А-дискі деп аталады).

Бұлшықеттің құрылысы



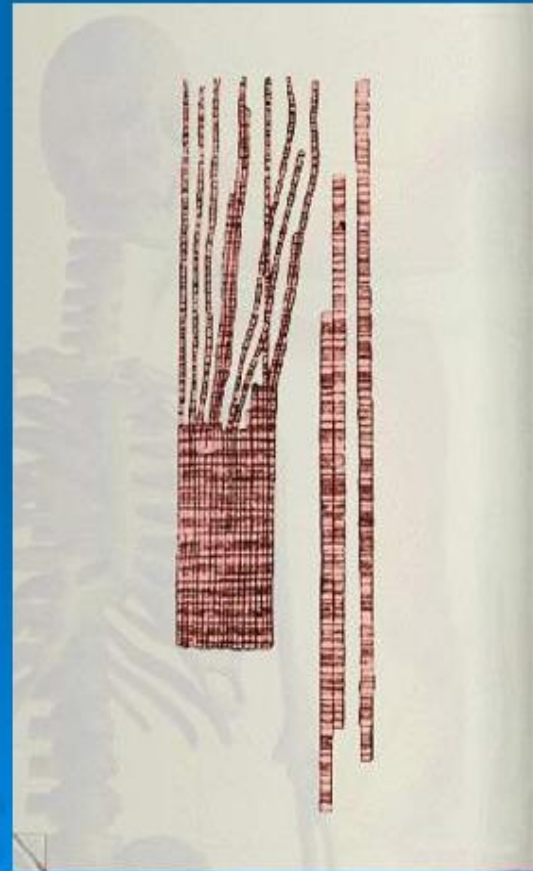
Бұлшықеттің құрылысы:



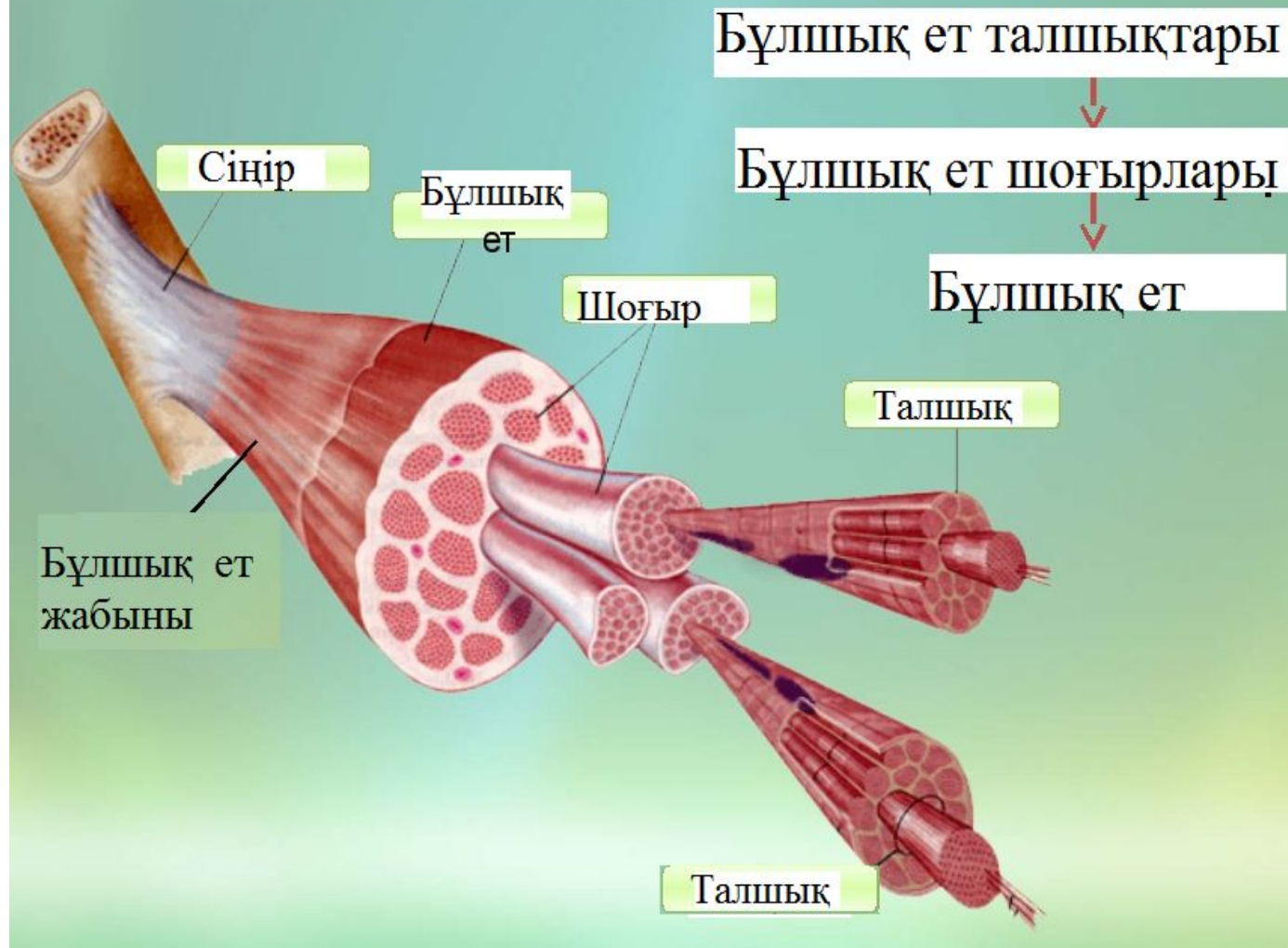
1 – бұлшықет талшығының қабықшасы; 2 – бұлшықет талшығының шоғыры; 3 – бұлшықеттің жуан талшықтары; 4 – бұлшықеттің жіңішке жіп тәрізді талшығы.

Бұлшықеттің құрамы

- Бұлшықетке бұлшықет талшықтары кіреді, олар бір-біріне параллель орналасқан және түйіндерге бірігеді. Бөлек бұлшықет түйіндерінің және бүкіл бұлшықеттің жұқа дәнекерұлпалы қабығы болады, ал бұлшықет топтары немесе бөлек бұлшықеттер қалың қабықпен – фасциямен қапталған. Бұлшықеттер сіңірлермен аяқталады, сіңірлер арқылы сүйектерге тіркеледі, сонымен қатар бұлшықетте қан тамырлары мен жүйкелер болады.



Бұлшық еттің құрылысы



Қозу ет талшығы сарколеммасын бойлай әртүрлі жылдамдықпен тарайды.

- қаңқа етінде секундiне 3,5-14 м;
- жүрек етінде 0,9-1 м;
- бірыңғай салалы етте 0,5 мм-ден 5-10 см.

Бұлшықеттердің түрлері



Бірыңғай салалы

Бірыңғай салалы (тегіс) бұлшықет

- Бірыңғай салалы бұлшықет ішкі мүшелердің қабырғаларында – бронхтар, асқазан, ішектер, жатыр, жатыр түтіктері, қуық, сонымен қатар тамырларда кездеседі. Тегіс бұлшықеттің жиырылу қызметіне байланысты асқорыту жүйесі мүшелерінің қызмет етуі, тыныс алудың, қан және лимфа ағысының реттелуі, зәрдің бөлінуі, жыныс клеткаларын тасымалдау және т.б. қамтамасыз етіледі.
- Бұлшықет баяу жиырылады, ұзақ шашамайды. Жиырылуы ритімдік, белгілі бір уақыт аралығында. Осы бұлшықет ұлпасы мезенхимадан дамиды, клеткалар бір бағытта созылады, ұршықтәрізді пішінге айналады, бір-бірімен жақындасып, тығыз пластты құрайды.

Көлдеңен жолақты бұлшықет

- Көлдеңен-жолақты бұлшықет ұлпасы қаңқа бұлшықеті мен кейбір ішкі мүшелердің бұлшықеттерін (жұтқыншақ, тіл, өңештің бөлігі) түзеді. Осы бұлшықеттердің жиырылуы ерікті жүзеге асырылады, яғни адамның еркіне бағынады. Ұлпа көпядролы ұзындығы 10-12 см дейін бұлшықет талшықтарынан тұрады.

Жүректің бұлшықетті

- Жүректің бұлшықет ұлпасы миоцит клеткаларынан тұрады, бір-бірімен бірігіп, кешен түзеді. Осы бұлшықет ұлпасы көлдеңен-жолақты ұлпаға ұқсас, бірақ еріксіз жиырылады, жүректің ритм автоматизміне бағынады.

Бұлшықеттердің қасиеттері

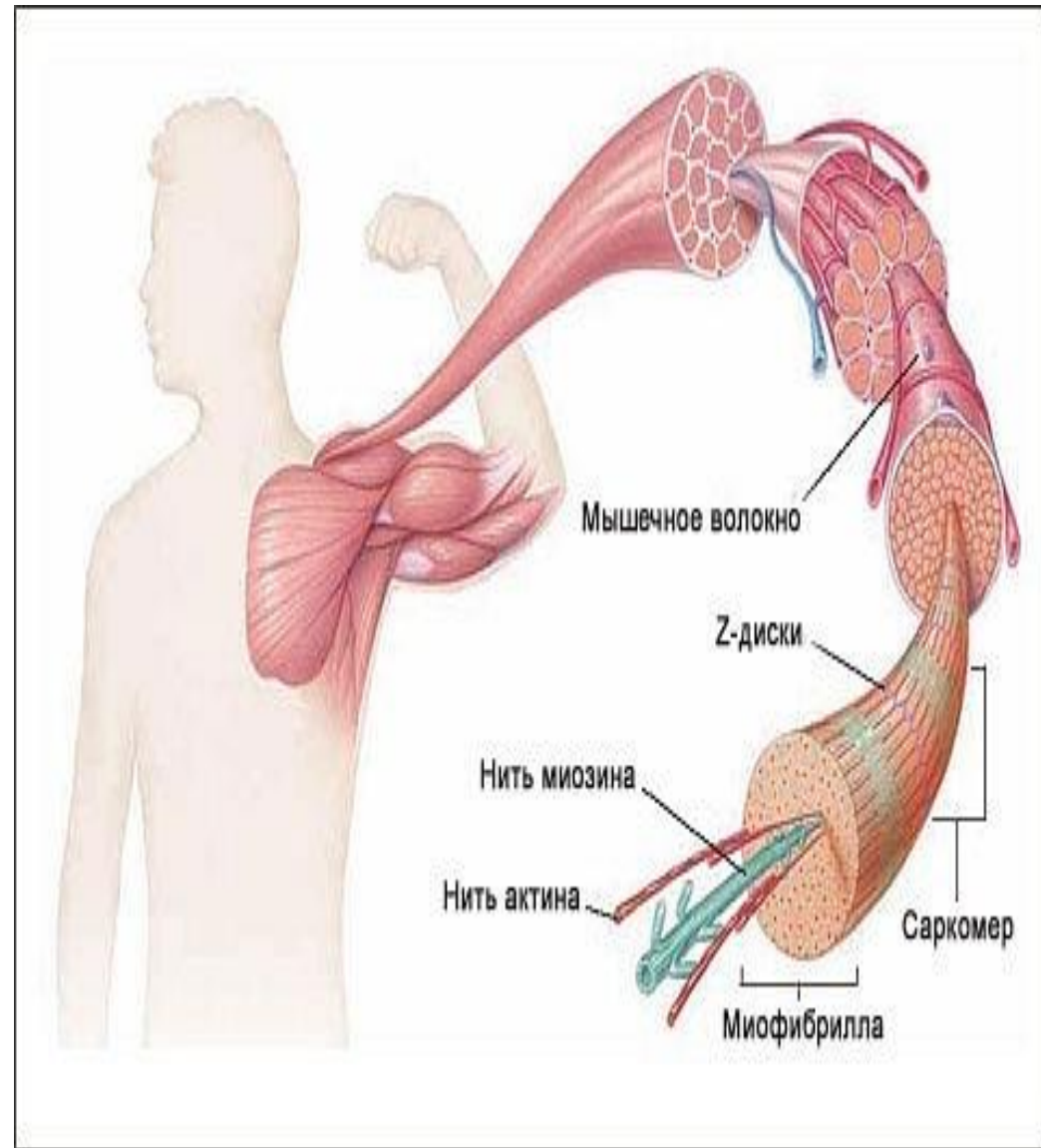
Қозғыштығы – жүйке қоздырғаштарына – импульстеріне жауап беру қабілеті.

Созылғыштығы – қалыңдығын азайта отырып, ұзындығын ұзарта алу қабілеті.

Жиырылғыштығы – қалыңдығы үлкейген сайын ұзындығын азайта алу қабілеті.

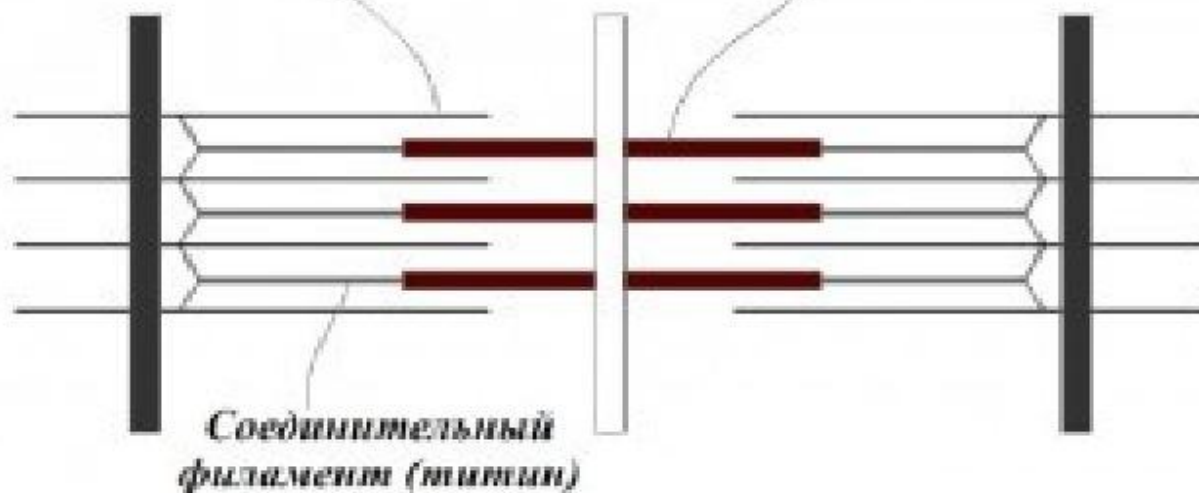
Майысуы – созылудан кейін бұрыңғы қалпына келу қабілеті.

Көлденең – жолақ құрылымды қарапайым микроскоппен көруге болады. Жеке талшықтардың $d = 20\text{--}80\mu\text{м}$ және қалыңдығы 10нм болатын плазмалық мембранамен (сарколемма) қоршалған. Әрбір жеке талшық – ол күшті тартылған жасуша. Жеке талшықтардың (жасушаларының) ұзындығы бұлшық еттің түріне байланысты, 100 микроннан бірнеше см-ге жетуі мүмкін.



*Тонкий филамент
(актин)*

*Толстый филамент
(миозин)*



Z

M

Z

Саркомер

Бұлшыетті талшықтың миофибриллалары кескінделген

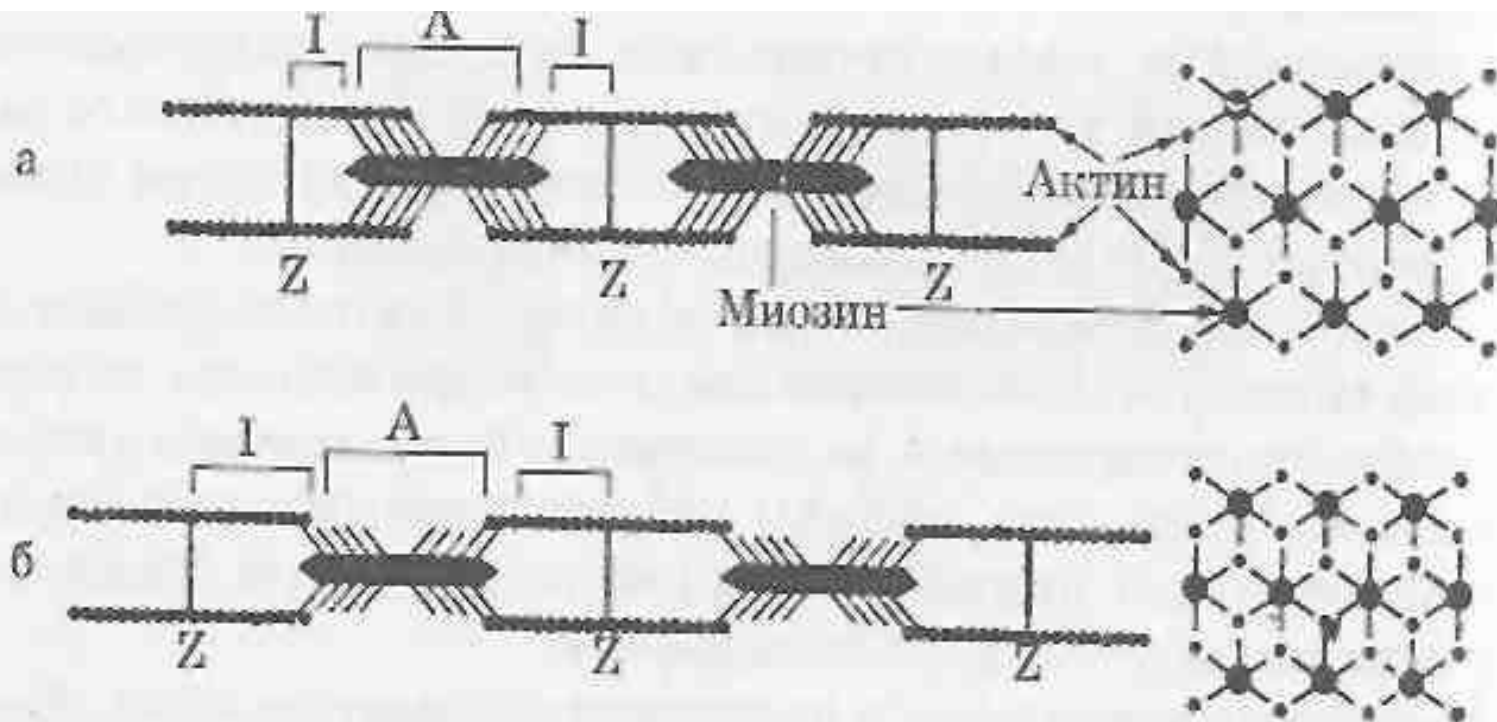
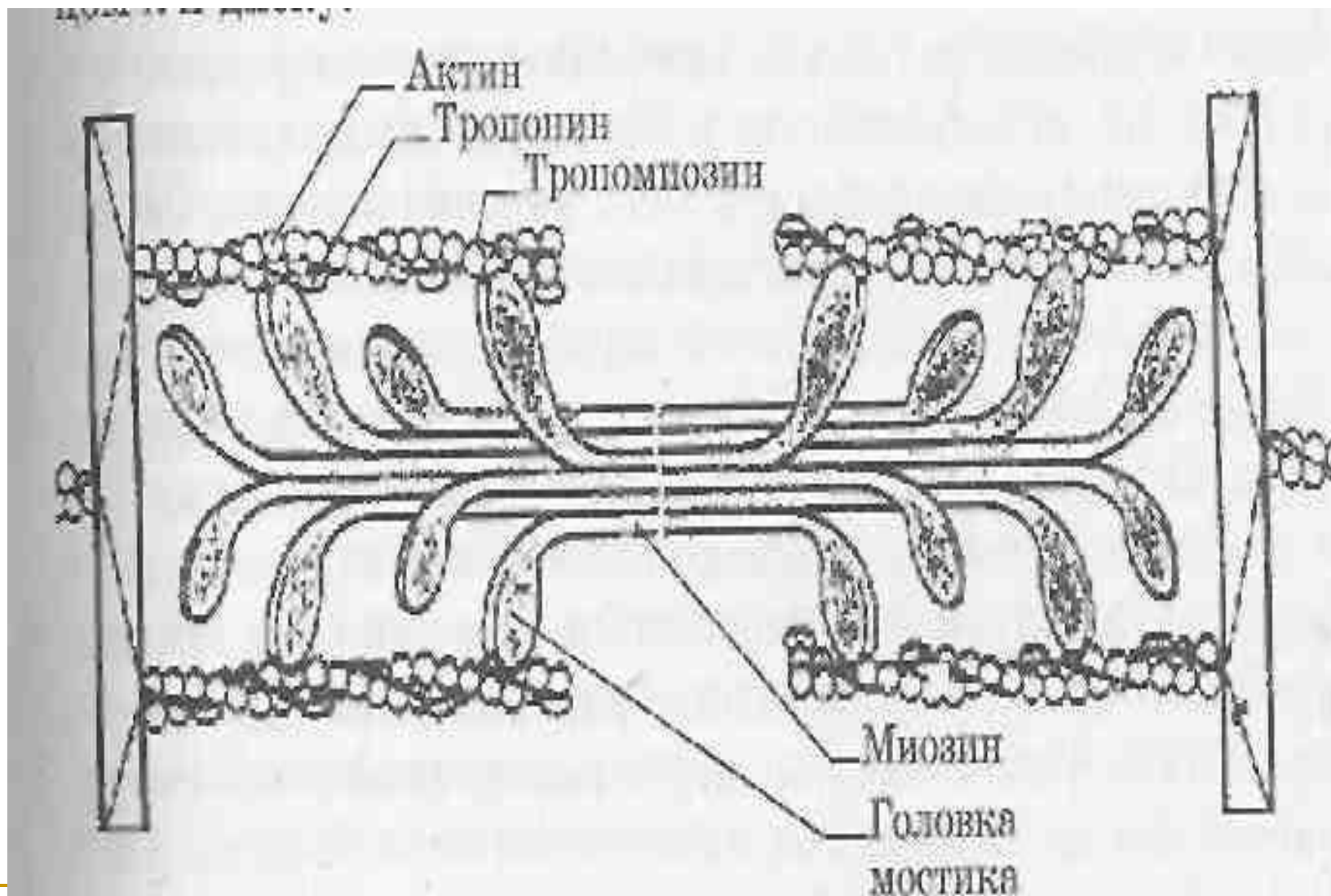


Рис. 7.1. Схематическое изображение миофибриллы мышечного волокна: а – состояние покоя, б – растяжение (подробности в тексте).

Справа – схема расположения актина и миозина на поперечном срезе

Саркомердің микроқұрылымы

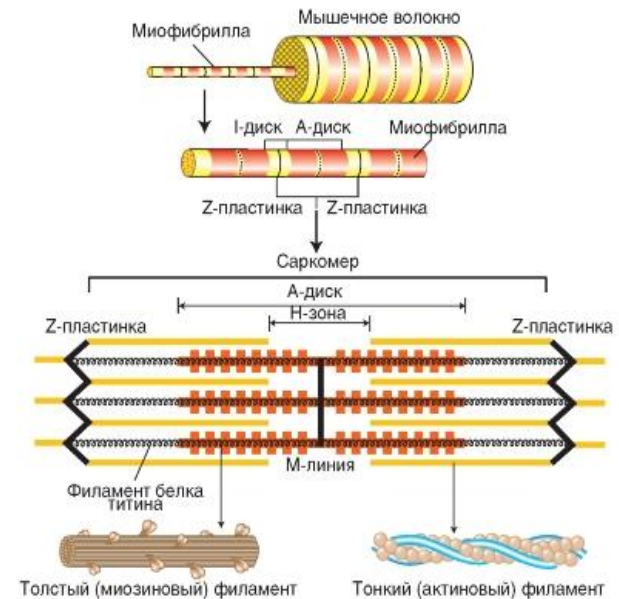


- Саркомер — бұл көлденең қимасы гексагоналды орналасқан жұқа және қалың жіпшелердің реттелген жүйесі болып табылады.
- Қалың жіпшенің қалыңдығы 12 нм және ұзындығы 1,5 мкм, ол ақуыз бен миозиннен тұрады.
- Жұқа жіпшенің диаметрі 8 нм, ұзындығы 1 мкм және Z-дискісіне бір жағына жалғанған актин ақуызынан тұрады.

А



Б

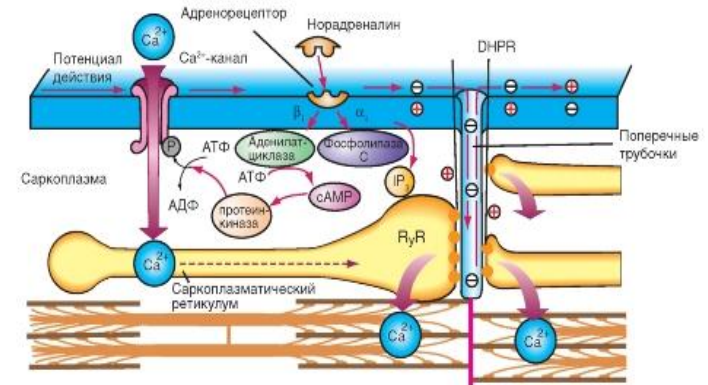
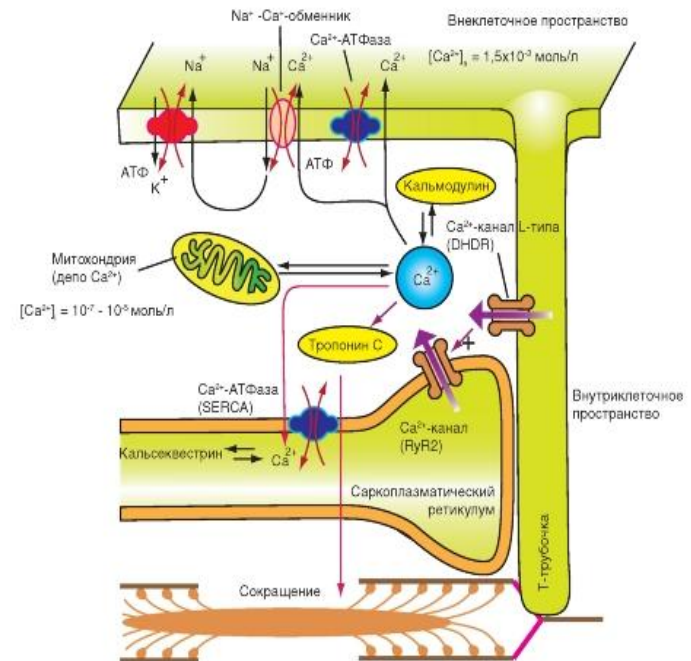


Жіпшелердің орналасуының негізгі моделдері:

1. Актин және миозин жіпшелерінің ұзындығы жиырылғанда өзгермейді.
2. Саркомердің жиырылғандағы ұзындығының өзгерісі дегеніміз актин және миозин жіпшелерінің көлденең ығысуының салыстырмалы қорытындысы.
3. Миозиннен бөлінген көлденең көпірлер кешендік актиннің орталығымен қосыла алады.
4. Көпірлер актинге бір мезгілде жалғанбайды.

Бұлшықеттердің жиырылуы

Ал актиндік жіпшелердің қозғалуы негізгі миофибрил ақуыздарының – миозиннің, актиннің, тропомиозиннің және тропониннің өзара әрекеттесуі нәтижесінде іске асады. Саркомердің қысқаруы АТФ-тың гидролизі және Ca^{2+} қатысуымен жүреді. Яғни Ca^{2+} бұлшықеттердің жиырылуы процесінің физиологиялық реттеушісі болып табылады. Нервтік импульс $\rightarrow$ деполяризация $\rightarrow \text{Ca}^{2+}$ $\rightarrow$ тропонин $\rightarrow$ тропомиозин $\rightarrow$ актин $\rightarrow$ миозин $\rightarrow$ актомиозин $\rightarrow \text{Ca}^{2+}$ ыдырауы Ca^{2+} АТФ-аза $\rightarrow$ эндоплазмалық ретикулум.

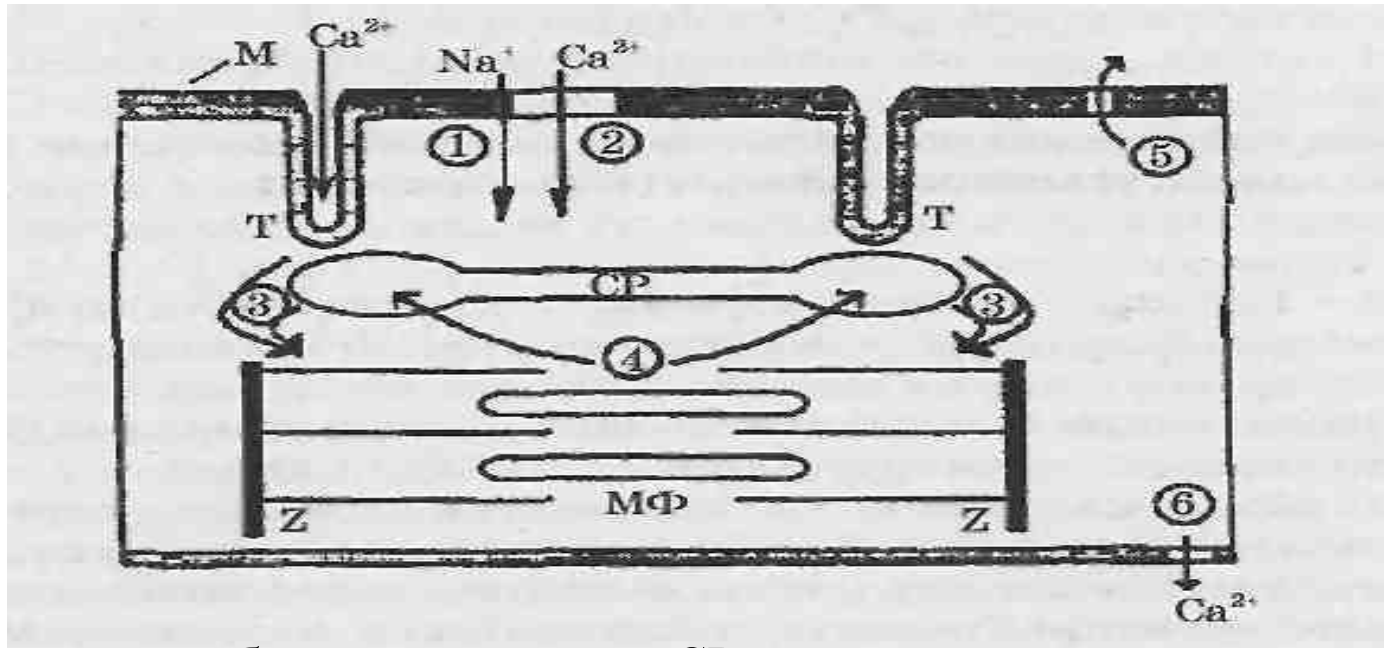


Нервтік импульс мембрананың деполяризациясын туғызып Ca^{2+} эндоплазмалық ретикулумнан босап шығуына жағдай жасайды. Ca^{2+} тропонинмен байланысып оның конформациясын өзгертеді, бұл өзгеріс әрі қарай тропомиозинге және актинге жетеді. Миозинмен актин әрекеттесіп, АТФ гидролизге ұшырайды. Сонан соң Ca^{2+} босайды, тропомиозин актиннің миозинмен байланысуын тежейді. Соның арқасында бұлшықеттің жиырылуы тоқтап, қайтадан орнына келеді. Ca^{2+} цитоплазмадан қайтадан эндоплазмалық ретикулумге енуі АТФ-аза насосы арқылы іске асады. Ол үшін энергия жұмсалады.

Электромеханикалық түйінделу – бұл сарколеммадағы (жасушалық мембрананың) әсер потенциалының пайда болуынан басталып бұлшықеттің жиырылуымен аяқталатын тізбектелген үрдістер циклы.

Үрдістердің тізбектелуінің бұзылуы патологиялық өзгерісті немесе өлу қаупін туғызады. Бұл үрдістің негізгі этаптары суретте көрсетілген.

Кардиомиоциттегі электромеханикалық түйінделудің схемасы

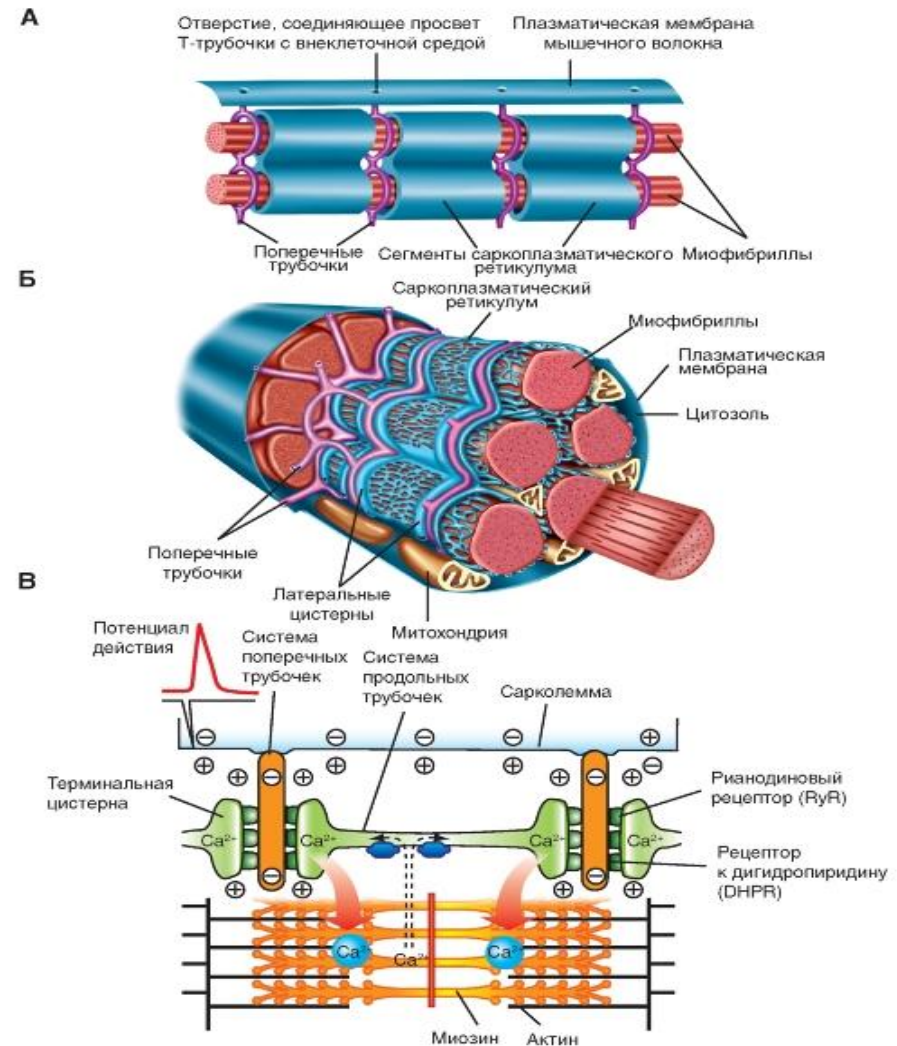


(М - жасушалық мембрана-сарколемма, СР – саркоплазмалық ретикулум, МФ - миофибрилла, Z - z-дискілері, Т - Т-көлденең түтікшелердің жүйесі);
Мембрана қозғанда жасушаға 1 - Na^+ және 2 - Ca^{2+} келуі, 3 - "кальций",
4 – СР-ге Ca^{2+} активті тасымалы, 5 – мембрана реполяризациясын тудыратын жасушадан K^+ , 6 - жасушадан Ca^{2+} активті тасымалының шығуы.

Бұлшық ет жиырылуының негізгі сипаттамалары жиырылудың бірлік қуаты мен бұлшық ет күші арқылы өрнектеуге болады. Сонымен қатар қысқару жылдамдығы ; механикалық жұмыс – $P \cdot x$; пайдалы қуат $P \cdot u$, жылу өнімі $q \cdot x$, толық жұмыс

$$W = P \cdot x + A$$

арқылы да сипатталады.



Бұлшықет жиырылуының түрлері

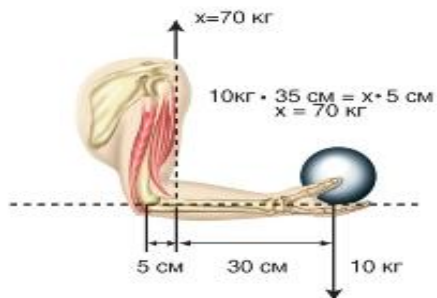
А



Б



В



Г

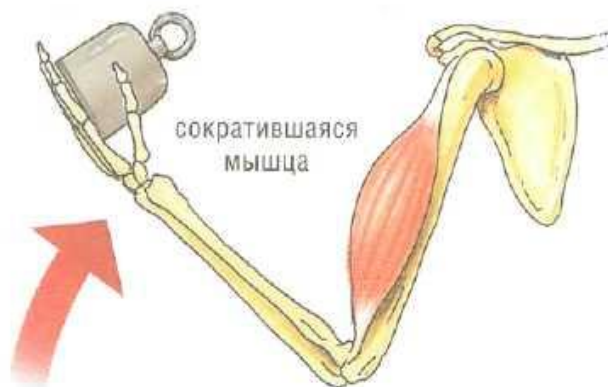


Жиырылу кезінде бұлшықеттің эффективті жұмысы жасалған жұмыстың жұмсалған энергияға E қатынасымен анықталады:

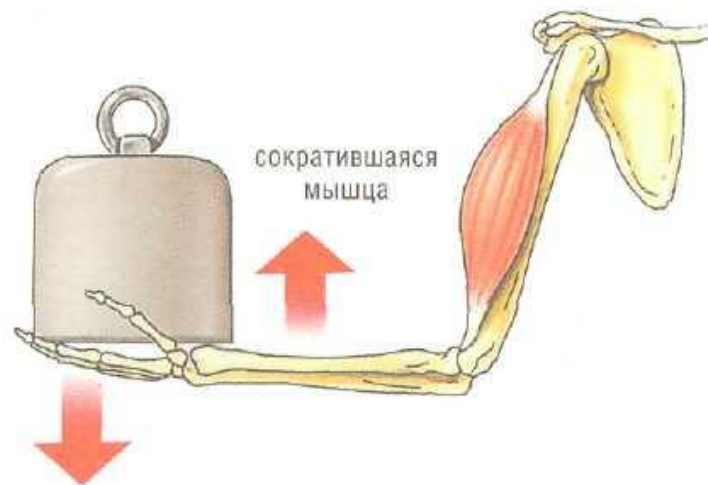
$$\xi_M = \frac{A}{\Delta E}.$$

Мышечное сокращение

изотоническое сокращение

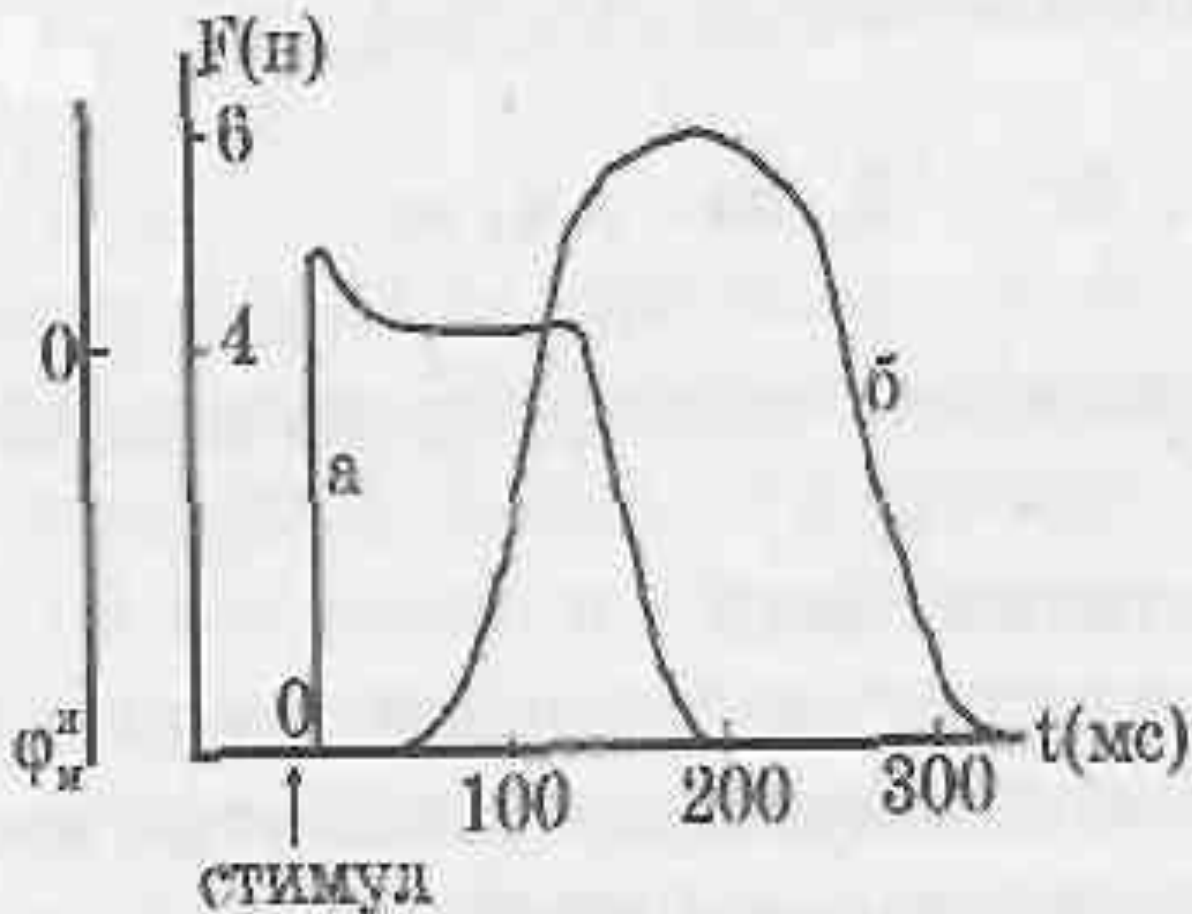


изометрическое сокращение



Барлық бұлшықет жасушасында кардиомиоцит сияқты түйінделу үрдісі жүрмейді. Себебі қаңқа бұлшықетінде жылуқандық әсер потенциалы қысқа (2-3 мс) және онда кальций иондарының ақырындап жүретін ағыны болмайды. Бұл жасушаларда көлденең түтікшелердің Т-жүйесі жоғары дамыған, жүйе арқылы өтетін деполяризация уақытында мембраналық потенциалдың өзгерісі *саркоплазматикалық ретикулум* СР мембранасына беріліп, Ca^{2+} иондары босап шығып, ары қарай жиырылу белсенділігі жүреді (3, 4, 5).

Көрсетілген үрдістер 4- суретте бейнеленген



Түрлі бұлшықет жасушасында Ca^{2+} иондары және ішкі жасушалық депо-саркоплазматикалық ретикулумды босатады және жиырылу белсенділігі арта отырып жүреді.

Қаңқа бұлшықеттің жиырылуының дамуындағы алғашқы бөгелуі 20 мс, ал жүректе – бірнеше есеп көп (100 мс-ке дейін) болады.

Бұлшық ет серпiмдiлiк, тұтқырлық, созылғыштық тәрізді механикалық және т.б. қасиеттеріне байланысты бұлшықеттің адам ағзасында алатын ролі үлкен болып саналады. Бұлшық ет жұмысының бұзылуы (мысалы, өкпенің, жүректің функциясы) патологиялық өзгеріске, яғни әртүрлі аурулардың тууына себепші болады.