

**E.Ismailov, N.Mamatkulov,
G'.Xodjayev,Q.Norboev**

**BIOFIZIKA VA
RADIOBIOLOGIYA**

Toshkent – 2018

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS
TA'LIM VAZIRLIGI**

E.Ismailov, N.Mamatkulov, G'.Xodjayev, Q.Norboyev

BIOFIZIKA VA RADIOBIOLOGIYA



5440100 – Veterinariya, 5410600 – Zootexniya, 511000 – Kasb
ta'limi (5111009 – Veterinariya), (5111015 – Zootexniya) bakalavr
ta'lim yo'nalishlari uchun darslik

**«Sano-standart» nashriyoti
Toshkent – 2018**

UO‘K: 577.3:619(075.8)

KBK: 28.07ya73

B 70

Biofizika va radiobiologiya / darslik: E.Ismailov, N.Mamatkulov, G'.Xodjayev, Q.Norboyev: «Sano-standart» nashriyoti, 2018-yil. – 488 bet.

Darslik O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligi tomonidan 2016-yil 25-avgustda №355 -buyrug‘i bilan tasdiqlangan. “Biofizika va radiobiologiya” fanining namunaviy o‘quv dasturi asosida yozilgan. Darslik 5440100 – Veterinariya, 5410600 – Zootexniya (tarmoqlar bo‘yicha), 511000 – Kasb ta‘limi (5111009 – Veterinariya), (5111015 – Zootexniya) bakalavr ta‘lim yo‘nalishlariga mo‘ljallangan.

Darslikda veterinariya va chorvachilik sohalari uchun katta ahamiyatga ega bo‘lgan biomexanika, bioakustika, gidrodinamika, biologik tizimlarda ko‘chish hodisalari, termodinamikaning biologik asoslari, bioelektromagnetizm, kvant biofizikasi, atom nurlari, radiobiologiyaga oid ma‘lumotlar bayon etilgan.

O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligi tomonidan veterinariya, zootexniya, kasb ta‘limi veterinariya va kasb ta‘limi zootexniya bakalavriat yo‘nalishlari talabalari uchun darslik sifatida tavsiya etilgan.

Taqrizchilar:

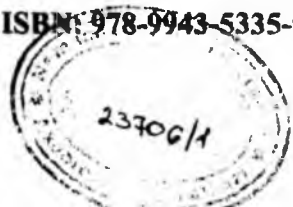
Z.F.Ismoilov – biologiya fanlari doktori, Samarqand davlat universiteti “Genetika va biokimyo” kafedrası professori.

N.O.Sodiqov – fizika-matematika fanlari nomzodi, Samarqand tibbiyot instituti “Biofizika” kafedrası mudiri, dotsent.

UO‘K: 577.3:619(075.8)

KBK: 28.07ya73

ISBN: 978-9943-5335-9-2



© E.Ismailov va boshqalar, 2018
© «Sano-standart» nashriyoti, 2018

SO‘Z BOSHI

O‘zbekiston Respublikasi “Ta‘lim to‘g‘risida” gi qonuni hamda “Kadrlar tayyorlash milliy dasturi” asosida yuqori malakali, ijodkorlik va tashabbuskorlik qobiliyatiga ega, kelajakda kasbiy va hayotiy muammolarni mustaqil hal qila oladigan, yangi texnika va texnologiyalarga tez moslashishga layoqatli kadrlarni tayyorlashda ta‘lim jarayonini Davlat ta‘lim standartlari asosida tuzilgan namunaviy fan dasturiga muvofiq yozilgan darsliklar bilan ta‘minlash muhim ahamiyatga ega. Ushbu darslik Davlat ta‘lim standartida belgilangan asosiy o‘quv materialini qamrab olgan va talabalar tomonidan bilimlarni mustaqil o‘zlashtirib olishga hamda ko‘nikma va malakalarni shakllantirishga, amaliy faoliyatda qo‘llashni o‘rganishga, ijodiy qobiliyatni shakllantirishga moslab yozilgan.

Darslikda “Biofizika va radiobiologiya” fani namunaviy o‘quv dasturi, uslubiy va didaktik talablari asosida barcha mavzular to‘liq yoritilgan, hamda turdosh ta‘lim yo‘nalishlarida foydalanish imkoniyatlari ham hisobga olingan.

Dasrlikda o‘quv materiallari tushunarli, mantiqiy va tizimli bayon etilgan hamda milliy xususiyatlarni shakllantirishga yo‘naltirilgan, faqat nazariy bilim berish bilan cheklanmasdan veterinariya, zootexniya va qorako‘lchilik mutaxassisliklariga oid amaliy ko‘nikmalarni shakllantiruvchi muammoli savollar va ijodiy topshiriqlar berish yo‘li bilan o‘quv materiallari aniq maqsad va vazifalarga yo‘naltirilgan. Mustaqil O‘zbekiston kelajagini fan va texnikaning sir-asrorlarini chuqur egallagan va hayotga tadbiiq qila oladigan yuqori malakali mutaxassislsiz tasavvur qilib bo‘lmaydi. har tomonlama yetuk mutaxassislarni tayyorlash, asosan, oliy ta‘lim muassasalari zimmasiga tushadi. Bunday sharaflil va o‘ta ma’suliyatli vazifani bajarish uchun yangi pedagogik texnologiyalardan va zamonaviy axborot texnologiyalardan dars berish jarayonida unumli foydalanish talab qilinadi. Mamlakatimiz mustaqillikka erishgandan buyon veterinariya, zootexniya va qorako‘lchilik ta‘lim yo‘nalishlari uchun o‘zbek tilida yozilgan “Biofizika va radiobiologiya” fani bo‘yicha darslik nashr etilmagan.

Mualliflar tomonidan tavsiya etilayotgan "Biofizika va radiobiologiya" fani darsligi ko'p yillar davomida shu fan dasturiga binoan o'qilgan ma'ruzalar asosida tayyorlandi.

Darslikda ko'pgina fizik qonuniyatlarning nazariyasi, ya'ni formulalarni keltirib chiqarishga e'tibor qaratilmasdan, balki o'rganilayotgan qonunlarning fizik mohiyati kasbiy yo'nalishlarga mos keluvchi qo'llanish sohalari va amaliy ahamiyatga ko'proq e'tibor berilgan.

Ushbu kitobda tirik organizmlarda kechadigan fizik jarayonlar va hodisalarning fizik mexanizmlari hamda biomexanika, bioakustika, ultratovushning veterinariya va qishloq xo'jalik amaliyotida qo'llanilishi, biologik tizimlarda ko'chish hodisalari, kapillyarlik hodisalarini tushuntirishda, yurak va qon tomirlarda qonning harakatini, elektr, magnit va optik hodisalar shu bilan birga ko'rish hodisasining biofizik mohiyati, nurlanishning tirik organizmlarga ta'siri va kasalliklarni davolashda qo'llash usullari, molekulyar va hujayra radiobiologiyasi, hujayralar va to'qimalarning nurlanishga reaksiyasi, Ionlashiruvchi nurlanishning organizm to'qimalari va organlarga ta'siri, radiobiologik effektlar, tashqi ionlashtiruvchi nurlanish ta'sirida kelib chiqadigan shikastlanishlar Ionlashtiruvchi nurlanishning ichki organlarga tushishi natijasidagi zararlanishlar, nurlangan organizmlar tiklanishi, radioekologiya va uning vazifalari, radioaktiv moddalarning organizmlarga tushishi, to'planishi va chiqarilishi, radioaktiv moddalar toksikologiyasi, ionlashtiruvchi nurlanishdan himoyalash, radiasion havfsizlikni ta'minlash, atom yadro nurlarining qishloq xo'jaligida qo'llanilishi to'liq bayon qilingan.

Darslik mualliflari O'zbekiston Milliy universiteti biofizika kafedrasi va Toshkent Davlat Agrar universiteti Fizika va kimyo kafedrasi jamoasiga darslikni yozishda bergan ko'rsatmalari uchun minnatdorchiligini izhor qilishadi.

KIRISH

Bizning tevarak-atrofimiz, barcha narsalar, bizning o'zimiz ham **materiyaning** bir bo'lagimiz. Keng ma'noda oladigan bo'lsak **materiya** bu moddiy borliqdir. Boshqa tabiiy fanlar kabi "Biofizika va radiobiologiya" fanining ham maqsadi tirik tabiat va tirik **organizmni** o'rganishdir. Materiya doimo harakatdadir. Bu harakat **oddiy** ko'chishdan tortib, tafakkurga qadar koinotda sodir bo'ladigan **hamma** o'zgarishlar va jarayonlarni o'z ichiga oladi. Biologik **harakat** materiya harakatining oliy formasidir, lekin oddiy harakatni bilmadan turib oliy harakat mexanizmini bilib bo'lmaydi. O'simlik va hayvonot olamida turli xil fizik va kimyoviy jarayonlar sodir bo'ladi. Ammo hayot harakatning oliy formasi sifatida unga har tomonlama yondashishni talab qiladi.

Tabiat qonunlariga asoslangan holda, biologiya, fizika va kimyoning tutashish joyida yangi fan "Biofizika va radiobiologiya" **fani** yuzaga keldi. Biofizika va radiobiologiya – biologik tizimlardagi fizik va fizik-kimyoviy jarayonlarni va tirik organizmga turli omillarning ta'sirini o'rganadi.

"Biofizika va radiobiologiya" faniga quyidagicha ta'rif berish mumkin.

"Biofizika va radiobiologiya" -- fizik va fizik-kimyoviy jarayonlarni, biologik tizimlar ultrastrukturasini tashkil qilishning hamma sohalarini submolekulyar va molekulalardan to to'qima va to'liq organizmgacha o'rganadigan fandır.

Tirik organizmda sodir bo'ladigan turli jarayonlarning murakabligiga va o'zaro bog'liqligiga qaramasdan, ular ichidagi fizik jarayonlarni ajratib ko'rsatish mumkin. Masalan, qon aylanishi bu jarayon suyuqlikning oqimi (gidrodinamika), tomirlar bo'ylab **elastik** to'lqinlarning tarqalishi (akustika), yurakning ishi va quvvati (**mexanika**), biopotensiallar generatsiyasi (elektr), nafas olishda gaz

harakati (aerodinamika), issiqlik uzatish (termodinamika), bug'lanish (fazoviy o'tishlar) va hokazo bo'limlarda o'rganiladi.

Tirik organizmda fizik mikrojarayonlardan tashqari molekulyar jarayonlar ham sodir bo'ladi va ular biologik tizimlarning holatini belgilaydi. Bunday mikrojarayonlarning fizikasini tushunish organizm holati, ba'zi bir kasalliklarning tabiatini anglash, dorilarning ta'sirini va shu kabilarni to'g'ri baholash uchun zarurdir.

Kasalliklarga tashxis qo'yish biologik tizimlarni tadqiq qilishning fizik usullari, prinsiplari va g'oyalaridan foydalanishga asoslangan. Ko'pgina zamonaviy tibbiy asboblarning tuzilishiga ko'ra fizik asboblardir, ulardan qon bosimini o'lchash, organizm ichkarisidagi tovushlarni eshitish, ichki organlarning kasal yoki sog'ligi haqida axborot olish, issiqlikdan kengayishga asoslangan termometrlar esa tibbiyotda keng tarqalgan tahlil qilish asboblari. Hozirgi davrda texnika va elektronikaning rivojlanishi tirik organizmda hosil bo'ladigan kuchsiz biopotensiallarni yozib olishga imkon bermoqda. Masalan, EKG yurak biopotensiallarni yozib olishdir. Tola optikasiga asoslangan endoskoplar esa organizm ichki qismlarini ko'rishga imkon bermoqda. Spektral tahlil qilishdan esa kriminalistika, gigiyenada, farmakologiyada va biologiyada foydalaniladi. Rentgen nuri yordamida tashxis qo'yishda nishonlangan atom usullari ham keng qo'llanilmoqda.

Tibbiyot va veterinariyada turli davolash usullari ichida davolashning fizik omillari ham alohida o'rin egallaydi. Masalan, suyak singanda gipslash, davolash maqsadida sovitish (krioterapiya), isitish yoki elektr yordamida isitish usullari, ul'traqizil, infraqizil, rentgen, gamma nurlar davolashda keng qo'llanilmoqda.

Tibbiyot va veterinariyada ishlatilayotgan materiallar fizik xossalarini o'rganish ham muhimdir, chunki bunday materiallar mavjud sharoitda ishlatilishini baholash uchun ular tayyorlangan materiallar fizik xossalarini o'rganish kerak. Masalan, protezlar

tayyorlash uchun qoʻllanilayotgan materialning mexanik mustahkamligini, elastikligini, issiqlik oʻtkazish qobiliyatini, elektr oʻtkazuvchanlikni va boshqa xossalarni bilish muhimdir.

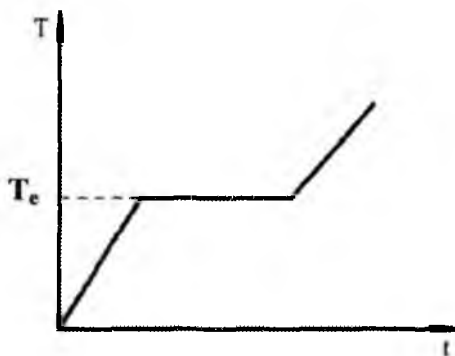
Tirik organizm atrof-muhit bilan oʻzaro taʼsirlashgan holdagina yashashi mumkin. U muhitning harorat, namlik, havo bosimi va boshqa fizik xarakteristikalarining oʻzgarishlardan keskin taʼsirlanadi. Tashqi muhit yordamida davolash ham mumkin. Masalan, klimatoterapiya va baroterapiya.

I bob. BIOMEXANIKA ASOSLARI

§ 1.1 Qattiq jismlar deformatsiyasi

Moddalar molekularining joylashishiga qarab uch xil agregat holatida bo'lishi mumkin; qattiq, suyuq va gaz holatlarida. Qattiq jismlarning o'zi ham ikki turga bo'linadi: kristall va amorf jismlar. Kristall holati anizotropiya, ya'ni fizik (mexanik, issiqlik, elektr, optik) xossalarning yo'nalishga bog'liq bo'lishidir. Kristallar anizotropiyasining sababi ularni tashkil etgan atom va molekularning tartibli joylashishidir. Odatda kristall jismlarning polikristallari bir-biri bilan tutashib, tartibsiz joylashgan, ayrim kichkina kristallchalar shaklida uchraydi. Bu holda anizotropiya xossasi shu kristallchalar chegarasida kuzatiladi.

Kristallar atom va ionlari bir-biridan bir xil masofada joylashib, panjara hosil qiladi va panjara tugunlarida tebranma harakatda bo'ladi. har bir kristall modda uchun aniq erish va qotish harorati mavjud bo'lib, grafik usulida quyidagicha ifodalash mumkin. (1.1-rasm).



1.1-rasm. Qattiq jismning erish va qotish diagrammasi:
T-harorat, t-vaqt, T_e -erish harorati

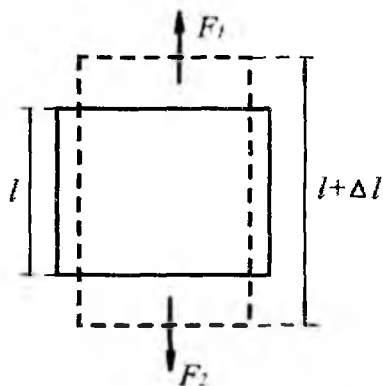
Jism harorati oshishi bilan atom va ionlar tebranma harakati osha boradi va har bir qattiq jism uchun aniq bir haroratda kristall panjara buzila boshlaydi. Tashqi berilayotgan issiqlik energiyasi shu panjarani buzishga sarflanadi. Toki hamma panjaralar buzilguncha kristall harorati o'zgarmaydi. Bu haroratga erish harorati deyiladi.

Shunday jismlar borki, ularning na aniq shakli, na aniq erish nuqtasi bor. Bunday jismlarga amorf jismlar deyiladi. Ular izohrop xossaga ega, ya'ni fizik xossalari yo'nalishga bog'liq emas. Amorf jismlarning har qanday haroratda suyuq qismi ham, qattiq qismi ham bo'lishi mumkin. Bunday jismlarga parafin, mum, shisha kiradi. Kristallarda uzoq tartibli joylashuvi o'rinli bo'lsa, suyuq va amorf jismlarda atom va molekulalarning yaqin tartibli joylashuvi o'rinlidir.

Har qanday qattiq jism tashqi ta'sir tufayli o'z shakli va o'lchamlarini o'zgartirish xususiyatiga ega. Bu hodisaga deformatsiya deyiladi.

Agar tashqi ta'sir to'xtatilgandan so'ng jism o'zining boshlang'ich shakliga qaytsa, bunday deformatsiyaga elastik, qaytmasa plastik deformatsiya deyiladi.

Umuman olganda, hamma deformatsiyalar plastikdir. Lekin kuch kichik bo'lganda elastik deformatsiya kuzatilishi mumkin. Deformatsiyaning turli shakllari mavjud: cho'zilish (siqilish), siljish, buralish, egilish. Bularni cho'zilish yoki siqilish deformatsiyasiga olib kelish mumkin. Jismga tashqi deformatsiyalovchi kuch ta'sir etganda atomlar (ionlar) orasidagi masofa o'zgaradi. Bu esa atomlarni oldingi vaziyatga qaytarishga intiluvchi ichki kuchlarni yuzaga keltiradi. Bu kuchlarning o'lchovi mexanik kuchlanishdir.



1.2-rasm. Cho'zilish deformatsiyasini tasvirlash chizmasi

Jism kundalang kesimining birlik yuziga ta'sir qiluvchi kuchga mexanik kuchlanish deyiladi.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1.1)$$

Bu yerda σ – mexanik kuchlanish, F – kuch, S – yuz
Kuch yuzaga normal bo'lsa, ya'ni yuzaga nisbatan perpendikulyar holatda ta'sir qilsa – normal kuchlanish, kuch yuzaga urinma holda bo'lsa, tangensial kuchlanish deyiladi.

Deformatsiya darajasi nisbiy deformatsiya orqali aniqlanadi.

Bo'ylama deformatsiyada $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$ yoki ko'ndalang siqilishda esa

$$\varepsilon' = -\frac{\Delta d}{d} \quad (1.2)$$

Bunda ℓ – sterjenning uzunligi, d – sterjen diametri

Tajribadan ε' va ε orasida quyidagi bog'lanish borligi kelib chiqadi.

$$\varepsilon' = -\mu \cdot \varepsilon \quad (1.3)$$

Bunda μ – materialga bog'liq musbat koeffitsiyent (Pousson koeffitsiyenti).

Ingliz fizigi R.Guk kichik deformatsiyalar uchun nisbiy deformatsiya kuchlanishga to'g'ri proporsional ekanini aniqladi.

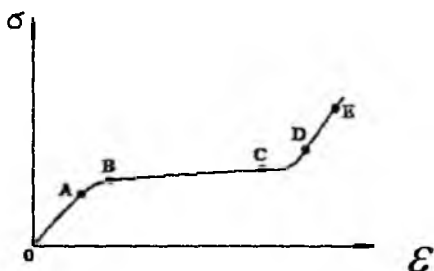
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.4)$$

Bunda E – Yung (elastiklik) moduli. Yung moduli nisbiy uzayish birga teng bo'lgandagi kuchlanish bilan aniqlanadi. Yuqoridagi formulalardan quyidagi bog'lanish kelib chiqadi.

$$F = \frac{E \cdot S}{\ell} \cdot \Delta \ell = k \cdot \Delta \ell \quad (1.5)$$

(1.5) formula Guk qonunining matematik ifodasi. k – elastiklik koeffitsiyenti. 1.3-rasmda kuchlanish bilan nisbiy deformatsiya orasidagi bog'lanish ko'rsatilgan. OA – elastik deformatsiya, B –

elastiklik chegarasi bo'lib, shunday maksimal kuchlanishni harakterlaydiki, bunda tashqi kuch ta'siri olingandan so'ng jismda qoldiq deformatsiya qolmasdan, u yana o'z shaklini tiklay oladi. BC – gorizonttal oraliq kuchlanishning oquvchanlik chegarasidir, ya'ni bu oraliqda kuchlanish oshmasdan deformatsiya oshib boradi. E – nuqta esa jismning buzilishi (uzilishi) oldidan jismga qo'yilgan eng katta kuchlanish jismning mustahkamlik chegarasi deyiladi. Moddalar elastiklik xossalari orasida juda katta farq bor. Masalan, po'lat mustahkamlik chegarasidan 0,3% cho'zilgandayoq uziladi, yumshoq rezinalarni esa 300% cho'zish mumkin. Bunday farq sifat tomondan yuqori molekulyar bog'lanishlar elastikligi mexanizmi bilan bog'liq.



1.3-rasm. Mexanik kuchlanish va nisbiy deformatsiya orasidagi bog'lanish: σ -mexanik kuchlanish, ϵ -nisbiy deformatsiya

Ba'zi moddalar mustahkamlik chegarasi va Yung moduli qiymati quyidagi jadvalda keltirilgan.

1.1–jadval

Modda	Yung moduli,	Mustahkamlik chegarasi, MPa
po'lat	200 GPa	500
organik shisha	3,5 GPa	50
shishali kapron	8 GPa	150
elastin	0,1 – 0,6 MPa	5
kollogen	10 – 100 MPa	100
suyak	10	100

Elastik siqilgan sterjen potensial energiyasi tashqi kuchlar bajargan ishga tengdir

$$\Pi = A = \int_0^{\Delta l} F \cdot dx \quad (1.6)$$

Bunda Δl – absolyut uzayish. Guk qonunidan elastik siqilgan sterjen potensial energiyasi

$$\Pi = \frac{\kappa \cdot (\Delta l)^2}{2} \quad (1.7)$$

ya'ni deformatsiya kvadratiga to'g'ri proporsional bo'ladi.

§ 1.2. Biopolimerlar tuzilishi va xossalari

Molekulalari ko'p miqdordagi atomlardan yoki atom guruhlaridan tuzilgan va kimyoviy bog'lanishlar bilan biriktirilgan uzun zanjir ko'rinishidagi moddalar polimerlar deyiladi. Polimerlarning kimyoviy tuzilishlarining o'ziga xos xususiyatlari ularning maxsus fizik xossalari yuzaga keltiradi.

Polimer hosil qiluvchi moddaga monomer deyiladi. Polimerlar nomi monomer nomiga "poli" so'zi qo'shilishi yordamida hosil qilinadi. Masalan:

Polietilen ... $-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \dots$

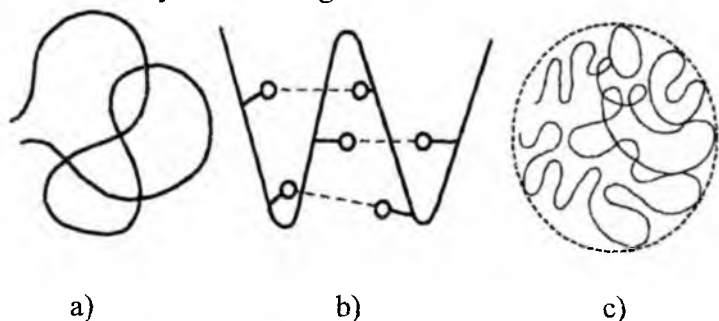
Polivinil xlorid ... $\text{CH}_2 - \text{CHCl} - \dots$

Bir xil kimyoviy tuzilishga ega bo'lsa ham polimerlar past molekulyar moddalardan o'zining mexanik xossalari bilan keskin farq qiladi. Polimerlar yyetarlicha mustahkam va shu bilan birga katta qaytuvchan deformatsiyalanish qobiliyatiga ega. Polimerlar mexanik xossalari jihatidan qattiq jism va suyuqliklar xossalari birlashmasidan tashkil topgan materiallardir.

Bitta monomerdan hosil qilingan polimerlar gomopolimerlar deb, ikki va undan ko'proq monomerdan tashkil topganlari sopolimerlar deb ataladi.

Hayvonlar va o'simliklardan olingan materiallar – jun, soch, ipak, paxta, tabiiy kauchuk va sh.k., shuningdek, sun'iy olingan materiallar – plastmassalar, tola, sintetik kauchuk kabilar ham polimer moddalar hisoblanadi. Organizmdagi oqsil moddalar: albumin, globulin, kazein, keratin va kollagenlar polimer materiallardir. Biopolimerlar barcha tirik organizmlar strukturasiining asosini tashkil etadi. Bular oqsillar, nuklein kislotalar, polisaxaridlar, glikoproteidlar, glikolipidlar va boshqalar.

Polimerdagi atomlar va ularning guruhlari orasidagi o'zaro ta'sir kuchlari va issiqlik harakati tufayli makromolekula o'lchamlari va shakli turlicha bo'lishi mumkin. Ushbu ta'sirlar natijasida polimer makromolekulasiining tashqi ko'rinishi o'zgarishiga konformasion o'zgarishlar deyiladi. 1.4-rasmda polimer makromolekulalarining ayrim konformasiyalari keltirilgan:



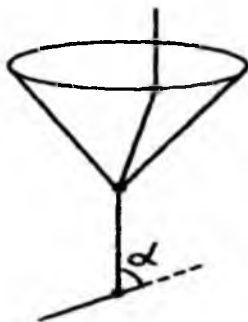
1.4-rasm. Polimer makromolekulalarining konformasiyalari.
 a – statistik o'ram, b – spiralsimon, c – globula.

Statistik o'ram shakliga ichki issiqlik harakati tezligi tashqi ta'sirlardan ustunroq bo'lgan makromolekulalar ega bo'ladi, bunday konformasiyani ko'pchilik polimerlar – polietilen, polipropilen, polibutadiyen va hokazolar egallaydi.

Spiralsimon konformasiya oqsillar va nuklein kislotalariga xos bo'lib, ularda ushbu shakl bo'lishiga atom guruhlari orasidagi ta'sirlar javobgardir (masalan, vodorod bog'lanishlar). Globula konformasiyasiga, ya'ni deyarli sferik shakldagi kompakt

konformasiyaga kuchli ichki molekulyar o'zaro ta'sirga ega polimer makromolekulalari ega bo'lishadi. Masalan, fluor atomiga ega bo'lgan polimerlar (politetrafluoretilen).

Polimer zanjirida valentli bog'lanishlar orasidagi burchaklar ma'lum qiymatga ega bo'ladi. (1.5-rasm). Bu esa zanjirdagi bir bo'g'in vaziyatining undan oldingi bo'g'in vaziyatiga bog'liqligiga olib keladi. Bunday zanjir erkin bo'g'implanganiga qaraganda kam sonli konformasiyani qabul qiladi, lekin katta egiluvchanlik qobiliyatiga ega.



1.5-rasm. Ma'lum qiymatli valent burchakli polimer zanjiri

Polimerlar molekulyar massasi bir necha o'n mingdan millionlargacha bo'lgani uchun juda katta o'lchamlarga ega bo'lishi mumkin. Polimerlar o'lchami juda katta bo'lgani tufayli ularning qaynash harorati haddan tashqari yuqori bo'ladi. Shuning uchun polimerlar kondensasiyalangan holatda: suyuq yoki qattiq holatda bo'ladi. Qattiq polimerlar amorf va kristall ko'rinishda bo'lishi mumkin.

Kristall polimerlarda atomlar, bo'g'inlar va zanjirlar joylashishida uzoq tartib mavjud. Amorf polimerlarda esa bo'g'inlar joylashishidagina yaqin tartib kuzatiladi.

Oqsil makromolekulalari konformasiyasi spiralsimon (fibrillar oqsillar) yoki globula (globulyar oqsillar) shaklida bo'lishi mumkin. Ushbu strukturalar (oqsillar uchun ular ikkilamchi deb ataladi,

birlamchi deb yaqin tartibdagi bo'g'inlar konformasiyasiga aytiladi), bir necha spirallarning bir-biriga chirmashib ketishi yoki tugun hosil qilishi bilan murakkablashadi. Ushbu strukturalar uchlamchi deb ataladi. Vodorod, tuz, disulfid va boshqa bog'lanishlar tufayli bir necha makromolekulalar umumiy tizim hosil qilishsa, to'rtlamchi struktura vujudga keladi.

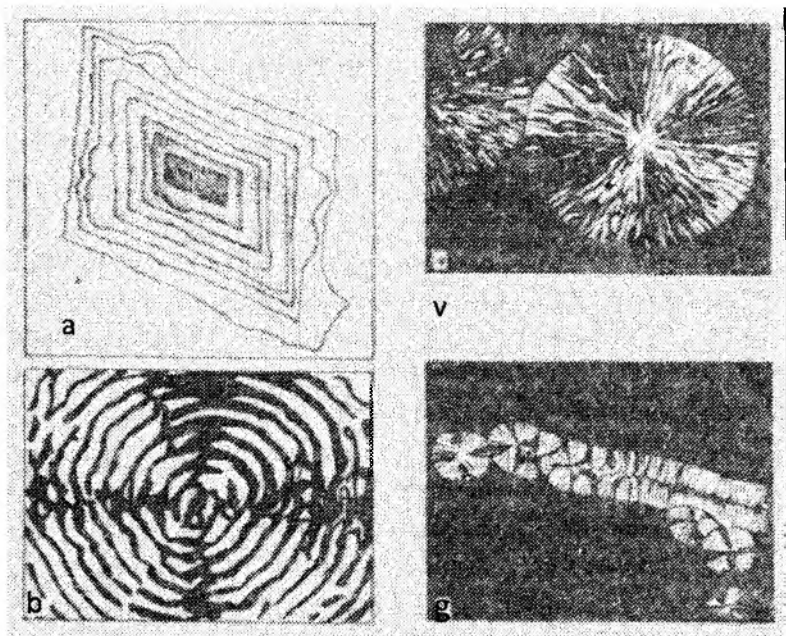
Polisaxaridlarda (sellyuloza va kraxmal) spiralsimon makromolekulalar bog'larga birikadi.

Amorf polimer yuqori elastiklik holatida kuchli deformatsiyalanish xossasiga (1000% gacha) ega bo'lib, uning deformatsiyalanishida qaytuvchanlik mavjuddir.

Kristall polimerlarning eng tarqalgan turlariga quyidagilar kiradi: kristallitlar, monokristallar, fibrillalar, sferolitlar. Ayrim kristall polimerlar tuzilishi 1.6-rasmda ko'rsatilgan.

Yuqori molekulyar strukturalarning o'lchami va shakli polimerlarning mustahkamligiga katta ta'sir ko'rsatadi. Masalan, kichik sferolitli polimerlar katta mustahkamlikka va yaxshi elastiklik xususiyatiga ega bo'lib, yirik sferolitli nusxalar esa mo'rtlik bilan buzilib ketadi.

Polimerlar o'lchamlari bir xil bo'lgan holda quyidagi uch turga bo'linadi : elastik , yarim elastik va qattiq to'g'ri tayoqcha. Ushbu bir-biridan elastikligi bilan farq qiluvchi polimerlar turli nazariy modellar bilan xarakterlanadi. Elastik polimerlar Zimm modeli asosida tushuntirilsa, qattiq tayoqcha holatidagi polimerlar uchun suyuq kristallik holatda ichki dinamik harakat deyarli yo'qligi tan olinadi. Yarim elastik polimerlar nazariyasi bu ikki chekka holat nazariyalarining sintetik birlashmasidan iborat.



1.6-rasm. Kristall polimerlar strukturasi.
a – monokristall (polietilen); b – halqali sferolit;
v – radial sferolit; g- sferolit tasma

Kratki-Porod modelida polimerning yarim elastik zanjirida erkin energiyaning o'zgarishi (dG) ning polimer konturi bo'ylab siljishi (ds) ga bog'liqligi quyidagi tenglama bilan aniqlanadi.

$$\frac{dG}{ds} = \frac{dG}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{ds} + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2G}{d\theta^2} \right) \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 \quad (1.8)$$

Zanjirda doimiy egilish momenti bo'lmasa

$$\frac{dG}{d\theta} = 0 \text{ va bu holda (1.8) tenglamadan}$$

$$\frac{dG}{ds} = \frac{k}{2} \cdot \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 \quad (1.9)$$

Bundan polimerning egilishga bikrligi uchun quyidagi tenglikka ega bo'lamiz:

$$k = \frac{d^2G}{d\theta^2} \quad (1.10)$$

To'la energiyaning o'zgarishi (ΔG)ni topish uchun (1.9) ifodani L-kontur uzunligi bo'yicha integrallaymiz:

$$\Delta G = \frac{k}{2} \int_0^L \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds \quad (1.11)$$

Zanjirning kichik siljishlarida egilish burchagi siljish uzunligiga proporsional bo'ladi ($\theta = r \cdot s$, bunda r -doimiy kattalik), u holda (1.11) tenglama quyidagicha bo'ladi.

$$\Delta G = kr^2 \int_0^L \frac{ds}{2} \quad (1.12)$$

Bu yerda $r = \frac{d\theta}{ds}$

Umumiy egilish burchagini quyidagi ifodadan topamiz:

$$\theta_L = \int_0^L r ds = rL \quad (1.13)$$

Shunday qilib, energiya uchun quyidagi tenglamaga ega bo'lamiz:

$$\Delta G = \frac{k \cdot \theta_L^2}{2L} \quad (1.14)$$

Egilish burchagini termodinamik muvozanatida bo'lgan tizimlar uchun Bolsman tenglamasidan foydalanib topish mumkin:

$$(\theta_L^2) = \frac{\int_0^\pi e^{-\Delta G/kT} \theta_L^2 d\theta_L}{\int_0^\pi e^{-\Delta G/kT} d\theta_L} = \frac{LrT}{k} \quad (1.15)$$

Zanjirning ko'ndalang yo'nalishlardagi siljishlarini hisobga olsak, (1.15) tenglamani 2 ga ko'paytirish kerak bo'ladi. U holda

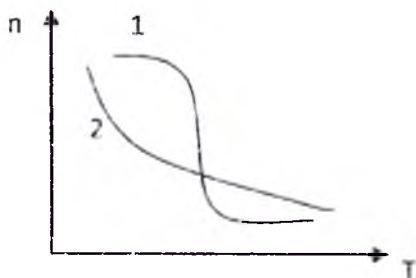
$$(\theta_L^2) = \frac{2LrT}{k} \quad (1.16)$$



Yuqoridagi mulohazalardan elastiklik kuchi paydo bo'lishi termodinamik xarakterga ega ekanligi kelib chiqadi.

Elastik zanjirning dumaloq o'ram shaklini egallashi uning termodinamik elastikligi bilan aniqlanadi. Eritmada polimerning eng ehtimoliyatli konformasiyasi – dumaloq o'ram shakli bo'lib, bunda tizim entropiyasi maksimal bo'ladi. Polimer cho'zilishida o'ram ochilishi boshlanadi va mumkin bo'lgan konformasiyalar soni kamayadi, bu entropiya kamayishiga olib keladi. Turli ko'p molekulali tizimlarda atomlar orasidagi barcha o'zaro ta'sirlarni ikki turga ajratish mumkin: ko'shni bo'g'inlar atomlari orasidagi yaqin tartibli o'zaro ta'sirlar, va zanjir bo'ylab bir-biridan uzoqdagi atomlarning zanjir egilishi paytida tasodifiy holda bir-biriga yaqinlashgan paytida hosil bo'lgan uzoqdan o'zaro ta'sir yoki hajmiy effektlar. Hajmiy o'zaro ta'sirlar tufayli yaqinlashgan qismlar bir-birini tortishi yoki itarishi mumkin. Harorat oshishi monomerlarning o'zaro itarilishini oshirsa, pasayishi ularning o'zaro tortilishiga imkon beradi. Shunday qilib, harorat o'zgarishi polimer o'lchamlarining o'zgarishiga olib keladi, bu esa monomer bo'g'inlari soni o'rtacha zichliklari (n) o'zgarishda o'z ifodasini topadi. 1.7-rasmda qattiq tayoqcha zanjiri va egiluvchan zanjir uchun bo'g'inlar soni o'rtacha zichligining haroratga bog'lanish grafigi keltirilgan.

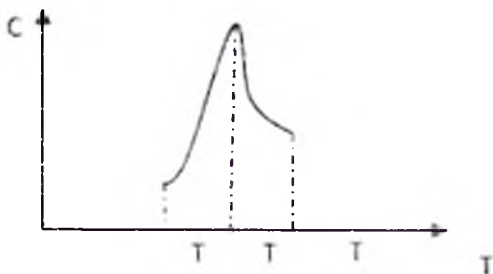
Quyida keltirilgan grafikda qattiq tayoqcha uchun harorat oshgan sari o'ramning globulaga aylanishi turli fazalar orasidagi birinchi turdagi o'tishi, ya'ni polimer, agregat holatining o'zgarishi bilan birgalikda ro'y beradi. Egiluvchan zanjirlar uchun bu o'tish issiqlik effektlarsiz, ikkinchi turdagi fazali o'tish kabi ro'y beradi.



1.7-rasm. Manomer bo'g'inlari soni o'rtacha zichligining haroratga bog'lanishi. 1-qattiq tayoqcha, 2-egiluvchan zanjir, n-bo'g'inlar soni o'rtacha zichligi, T-harorat

Yuqorida keltirilgan xulosalar gomopolimerlar uchun to'g'ri edi. Real biopolimerlarda konformasion o'zgarishlarini qarab chiqishda monomer bo'g'inlarining turli tabiatga ega ekanligi, hamda hajmiy o'zaro ta'sirlarning o'ziga xos xususiyatlarini hisobga olish zarur.

Oqsillarning harorat denaturasiyasi (tabiiy strukturasi buzilishi) birinchi turdagi faza o'tishiga yaqin bo'ladi. Issiqlik denaturasiyasi jarayonida biopolimerning globulyar (yoki spiral) holatdan denaturasiyalangan o'ramli holatga o'tishida issiqlik sig'imining o'zgarishi ro'y beradi. 1.8-rasmda biopolimerlar issiqlik denaturasiyasi sohasida issiqlik sig'imining o'zgarishi ko'rsatilgan.

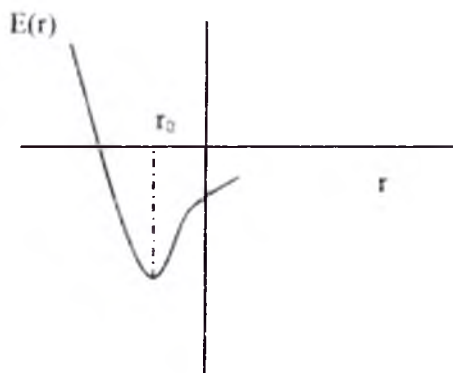


1.8-rasm. Biopolimerlar issiqlik denaturasiyasi sohasida issiqlik sig'imining o'zgarishi. C – issiqlik sig'imi T_1 - boshlang'ich harorat T_d – issiqlik yutishi maksimumining harorati, T_2 - erish jarayonining oxirgi harorati

Biopolimerlar harorati o'zgarganda mikrostrukturasining o'zgarishiga eritma tarkibi, uning pH qiymati ham o'z ta'sirini ko'rsatadi.

§ 1.3. Biopolimerlar orasidagi kuchlar

Polimer zanjirining asosiy ketma-ketligi yoki birlamchi strukturasi (oqsil zanjirdagi aminokislotalar, nuklein kislotalar zanjirdagi nukleotidlar) kimyoviy yoki valent o'zaro ta'sirlar bilan aniqlanadi, bundan tashqari molekulalar orasida kuchsiz kovalent kuchlar ta'sir etadi. 1.9-rasmda ikki zarracha o'zaro ta'sir potensial energiyasining ular orasidagi masofaga bog'lanish grafigi keltirilgan.



1.9-rasm. O'zaro ta'sir energiyasining masofaga bog'lanish grafigi.
E – potensial energiya, r- masofa, r_0 -muvozanat masofasi

O'zaro ta'sir kuch $F(r)$ o'zaro ta'sir potensial energiyasi bilan quyidagicha bog'langan:

$$F(r) = -\frac{dE(r)}{dr} \quad (1.17)$$

Kichik masofalarda molekulalar elektron qobiqlari o'zaro ta'sirlashganda itarish kuchlari kuchliroq, kattaroq masofalarda tortishish kuchliroq bo'ladi.

1.9-rasmda $E(r)$ egri chiziqning $r=r_0$ dagi minimumi itarishish va tortishish kuchlari tenglashadigan muvozanat vaziyatiga to'g'ri keladi.

Makromolekulalarning ikkilamchi strukturasi asosan quyida ko'rib chiqiladigan o'zaro ta'sir kuchlariga bog'liq: Van-der-Vaals o'zaro ta'sirlari, vodorod bog'lanishi, elektrostatik ta'sirlar.

Van-der-Vaals kuchlari suyuq va qattiq holatlar paydo bo'lishda real gazlardagi molekulalarning o'zaro ta'siri katta rol o'ynaydi. Biologik makromolekulalarni ham kondensasiyalangan tizimlar, deb qarasaq, ularda ham Van-der-Vaals kuchlari muhim ahamiyatga egadir.

Van-der-Vaals o'zaro ta'sirlari energiyasi 4–8 kJ/mol va undan yuqori bo'ladi. Molekulaning 300 K haroratdagi issiqlik energiyasi esa ~ 2 kJ/mol, kovalent bog'lanishlar energiyasi esa 170–630 kJ/molga teng. Van-der-Vaals kuchlari elektromagnit tabiatga ega bo'lib, qo'shni molekulalardagi elektr dipollar o'zaro ta'siri bilan aniqlanadi. O'zaro ta'sirlanuvchi molekulalar doimiy elektr dipollariga egaligi yoki bu dipol molekulalari elektron qobiqlarining qutblanishi natijasida hosil bo'lishiga qarab Van-der-Vaals kuchlarining turli tiplari mavjud.

Bir to'g'ri chiziqda yotuvchi ikki dipol o'zaro ta'siri (oriyentasiya o'zaro ta'siri) energiyasi quyidagicha bo'ladi:

$$E_0 = -\frac{2p_1^2 \cdot p_2^2}{3kTR^3} \quad (1.18)$$

Bunda p_1 , p_2 -dipol momentlari, k - Bolsman doimiysi, T -harorat, R - dipollar orasidagi masofa.

Doimiy dipol momentlariga ega bo'lmagan molekulalar orasidagi o'zaro ta'sir kuchlari dispersion yoki qutblanuvchan o'zaro ta'sirlar deb ataladi. Dispersion o'zaro ta'sirlar kvant-mexanik xarakteriga ega bo'lib, tashqi orbitadagi elektronlar harakati bilan bog'liq.

Dispersion o'zaro ta'sir energiyasi quyidagi formula yordamida ifodalanadi.

$$E_d = -\frac{1}{24(\pi\epsilon_0)^2 R^6} \sum nk \frac{|m_{n1}|^2 \cdot |m_{k2}|^2}{(E_{1n} - E_{10}) + (E_{2k} - E_{20})} = -\frac{A}{R^6} \quad (1.19)$$

Bunda m_{n1} ; m_{n2} - birinchi molekulaning n holatdan 0 holatga o'tish dipol momenti; m_{k2} -ikkinchi molekulaning k holatdan 0 holatga o'tish dipol momenti, E_{1n} va E_{2k} 1 va 2 molekulaning n va k holatidagi energiyalari.

Ikki molekulaning Van-der-Vaals o'zaro ta'siri (1.18) va (1.19) ifodalar yig'indisi bilan topiladi. Odatda buning o'rniga Lennard-Jons potensialini berish orqali aniqlanadi.

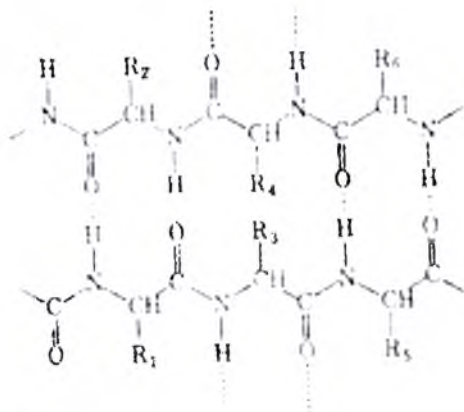
$$U = -\frac{A}{R^6} + \frac{B}{R^{12}} \quad (1.20)$$

Bunda A,B-tajribada aniqlanadigan doimiy sonlar, R -molekulalar orasidagi masofa. (1.20) ifodada birinchi had molekulalarning o'zaro tortishishga, ikkinchi had esa molekulalarning o'zaro itarishishiga mos keladi. Masalan , 0...0 o'zaro ta'siri uchun $A=1547,7 \text{ kJ} \cdot \text{nm}^2 / \text{mоль}$, $B = 895,23 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{nm}^4 / \text{mоль}$ qiymatga ega.

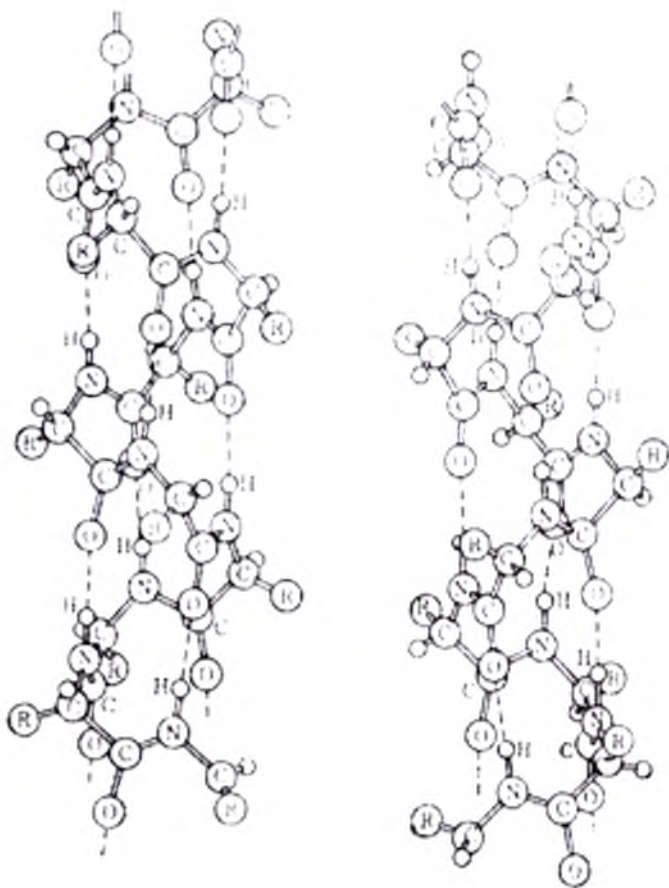
Vodorod bog'lanishda bitta molekulaning vodorod atomi bilan boshqa molekuladagi elektromanfiy O, N, F, Cl atomlar orasidagi bog'lanishga aytiladi. Vodorod bog'lanish tabiati murakkab bo'lib, faqatgina elektrostatik tortishishdan iborat bo'lmaydi.

Vodorod bog'lanishining energiyasi 10–40 kJ/mol oraliqda bo'ladi.

CO- va NH-guruhlar orasida vodorod bog'lanishlari hosil bo'lganda polipeptid zanjirida hosil bo'ladigan tuzilmaga ikkilamchi struktura deyiladi. 1.10-rasmda ikki polipeptid zanjirda hosil bo'lgan vodorod bog'lanishlari punktir chiziqlar bilan kovalent bog'lanishlar tutash chiziqlar bilan ko'rsatilgan.



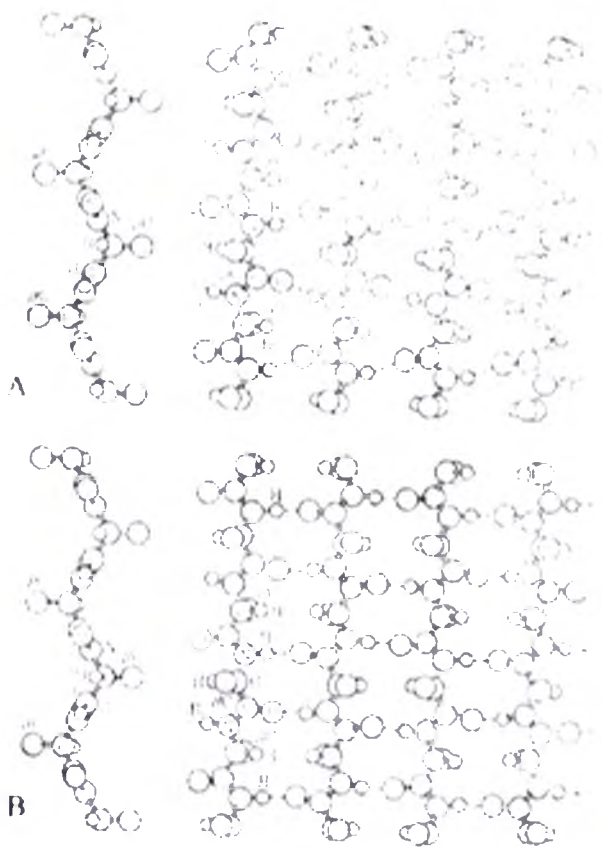
1.10-rasm. Ikki polipeptid zanjirlari orasidagi vodorod bog‘lanishlar



1.11-rasm. Oqsilning α -spiral strukturasi: R-yon radikallar; tutash chiziqlar kovalent bog‘lanishlar, punktir chiziq-vodorod bog‘lanishlar

Polipeptid zanjiri ikkilamchi strukturasi α -spiral yoki β -struktura ko‘rinishida bo‘lishi mumkin. Oqsildagi α -spiral quyidagi shartlarga bo‘ysinadi: 1) C-N peptid bog‘lanishi planar (bitta tekislikda yotuvchi) bo‘lishi; 2) vodorod bog‘lanishlari C=O va N-H guruhlari orasidagina bo‘lishi zarur (1.11- va 1.12- rasmlar)

Yagona polipeptid zanjiri hosil qiladigan α spiraldan farqli ravishda β -struktura ikki polipeptid zanjirlar orasida hosil bo'ladigan vodorod bog'lanishlar tufayli paydo bo'ladi. (1.12-rasm)



1.12-rasm. Oqsilning turli β -strukturalari. A-parallel, B-antiparalel

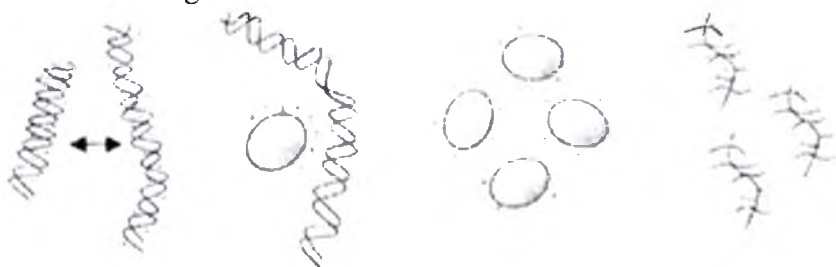
A-spiral va β -struktura tipidagi ikkilamchi strukturalar vodorod bog'lanishlari tufayli hosil bo'ladi va nordon hamda asosiy amino-kislotalar qoldiqlari orasidagi elektrostatik o'zaro ta'sirlar tufayli mustahkamlanadi. Peptid zanjirlaridagi turli atomlar ularda zaryad

taqsimotiga qarab bir-biridan farq qiladi. Zaryadlangan atomlar orasidagi o'zaro ta'sir potensial energiyasi quyidagi tenglama bilan aniqlanadi:

$$E_{ij} = \sum_{ij} \frac{q_i q_j}{\epsilon \cdot R_{ij}} \quad (1.21)$$

Bunda q_i, q_j - atomlardagi zaryadlar, R_{ij} - atomlar orasidagi masofa, ϵ -dielektrik sindiruvchanlik (oqsillar uchun 3,5 ga teng deb olinadi).

Elektrostatik o'zaro ta'sir energiyasi ~ 500 kJ/mol. 1.13-rasmda molekulyar o'zaro ta'sirda elektrostatik kuchlar asosiy bo'lgan hollar ko'rsatilgan.



1.13-rasm. Elektrostatik kuchlarning molekulyar tizimlarda ta'sir etishi

§ 1.4. Muskul mexanikasi

Muskul kimyoviy energiyani ish bajara oladigan mexanik energiyaga aylantirish xususiyatiga ega. Bu ish ixtiyoriy harakatlarni bajarish, shuningdek, ichki organlarning harakati uchun sarf bo'ladi. Muskullar o'z xossalariга ko'ra odatdagi qattiq jismlardan farq qiladi va elastomerlar, ya'ni kauchuk tipidagi materiallar jumlasiga kiradi. Buning sababi shuki, muskullar bilan kauchukning elastiklik moduli taxminan bir xil ($1 \cdot 10^8$ N/m²) muskul bilan kauchuk cho'zilganida rentgen nurlari difraksiyasining o'zgarishlari bir xil bo'ladi, harorat o'zgarishlariga muskul ham, kauchuk ham bir xil reaksiya ko'rsatadi. Muskul qisqaruvchan va elastik elementlardan tashkil topgan. Bu tizimning xossalari gliserin bilan ishlangan

muskul preparatlar membrana borligidan kelib chiqadigan xossalarni yo'qotib qisqaruvchan tizimlarni saqlab qoladi.

Bundan tashqari, aktomiozin eritmasi yoki aktin va miozin preparatlaridan qisqaruvchan modda iplarini sintezlash mumkin.

Shartli ravishda, odatda, muskullar modellari deb ataladigan ana shunday preparatlar muskul faoliyatini o'rganish uchun juda qulay obyekt hisoblanadi. Mana shunday modellarga va tirik muskullarga har xil stimulyator ta'sir ettirib olingan eksperimental ma'lumotlarning o'z parametrlari jihatidan bir-biriga yaqin bo'lishini tekshirishlar ko'rsatib berdi. Masalan, modellarda hamda tirik muskulda izohetrik qisqarishdan kelib chiqadigan taranglik taxminan bir xil bo'ladi. Modellarda ham, tirik muskullarda ham ATF (Adenozintrifosfor) ning bir xil nisbatda bo'lishi kuzatiladi.

Muskullar ishi. Muskullarning kimyoviy energiyasi odatda issiqlik aylanmasdan turib qisqarishning mexanik energiyasiga aylanadi. Termodinamik hisoblar skelet muskuli qisqarganda kuzatiladigan foydali ish koeffitsiyenti (ko'pchilik hollarda bu koeffitsiyent 50 %ga teng bo'ladi) muskulning issiqlik mashinasi prinsipiga muvofiq ishlay olmasligini ko'rsatadi.

Ma'lumki, issiqlik mashinasi yuksak haroratli manbadan issiqlik olar ekan, uning bir qismini foydali ishga aylantiradi, qolgan issiqlik esa harorati bir muncha past bo'lgan qabul qiluvchi tomonidan yutiladi. Shu boisdan foydali ish koeffitsiyenti, masalan, 30 % bo'lgan issiqlik mashinasining ishlashi uchun juda katta haroratlar farqi bo'lishi talab qilinar ekan. Qabul qiluvchi harorati 37°S atrofida o'zgarib turadigan gavda haroratiga teng keladigan bo'lsa, u holda issiqlik manbaining harorati taxminan qip-qizil cho'g'lanish haroratiga yetishi mumkin. Shunday qilib, muskul issiqlik mashinasi singari ishlab, yoqilg'ining kimyoviy energiyaga aylantiradigan bo'lganda edi, ajralib chiqadigan energiyaning atigi 30 % ini o'zlashtirish haroratning shu qadar ko'tarilib ketishiga olib borar ediki, bunda muskulning qisqaruvchan oqsillari muqarrar denaturasiyaga uchrab qolgan bo'lar edi. Qisqarish vaqtida energiya

muskul bajaradigan ish uchungina sarflanmasdan, balki issiqlik ajralishiga ham sarflanadi. Ish vaqtida muskullarning issiqlik hosil qilishi ancha kuchayadi va muskullarning qisqarish tezligiga bevosita bog'liq bo'ladi. Muskul asta-sekin qisqarganda vaqt birligi ichida u tez qisqargandagiga qaraganda kamroq issiqlik ajralib chiqadi.

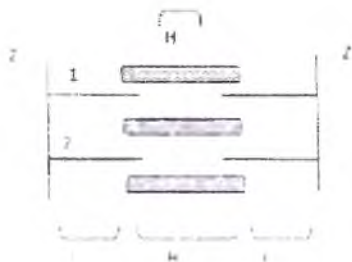
Ma'lumki, muskul tolalarining miofibrillalari Z-membranalar deb ataladigan qambar qora chiziqlar bilan ayrim qismlarga ajralsa (uzunligi taxminan 2,5 mkm keladigan qismlarga), ya'ni sarkomerlar bo'ylab joylashgan yorug' yo'llar, izohop yo'llar yoki I disklar deb atalsa, sarkomerning markazidagi qora yo'l anizohrop yo'l yoki A-disk deb ataladi.

A-disk markazida N – zona deb ataladigan birmuncha yorug' yo'l ko'zga tashlanadi.

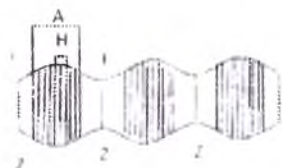
1.14-rasmda miofibrillaning bo'ylama kesimi, 1.15-rasmda esa uning sxematik tuzilishi ko'rsatilgan. 1.15-rasmdagi qora chiziqlar Z-chiziqlardir. Miofibrillaning ikkita Z-chiziqlar orasidagi qismi sarkomer deb ataladi.

Skelet va yurak muskul tolalarida miofibrillar o'rtasidagi bo'shliqda joylashgan endoplazmatik retikulumdan hosil bo'lgan alohida vakuolalar tizimi topilgan. Mana shu tizinning bir qismi muskul tolasi bo'ylab ketgan A – disklar sohasida joylashgan, u ko'ndalang holatni egallaydi va sarkolemaning plazmatik membranasiga aylanadi. Endoplazmatik retikulumning fazoda shu tariqa joylashuvi muskul tolasi ichida qo'zg'alish impulslari o'tishini ta'minlab beradi.

Z-disklar sohasiga mikroelektrodlar yordami bilan ta'sir berish avvaliga o'sha disk bilan cheklangan sarkomerlarining qisqarishiga sabab bo'lishi aniqlandi, keyinchalik esa qisqarish muskul tolasining boshidan oxirigacha ro'y beradi.



1.14-rasm. Miofibrillaning bo'ylama kesimi tasviri



1.15-rasm. Sarkomer tuzilishi tasviri

Haddan tashqari yupqa (ultrayupqa) kesmalarui rentgenostruktura analizi va elektron mikroskopda tekshirishdan o'tkazib olingan zamonaviy ma'lumotlar (Xaksli va Xanson) izohop disklar tabiatini aniqlashga imkon berdi. Bu tekshirishlar miofibrillarning necha yuzlab (o'rtacha 2500 ta) juda ingichka iplardan tashkil topganligini ko'rsatdi, shu iplarning har biri oqsil molekulalarining polipeptid zanjirlaridan hosil bo'lgan. Bu iplar o'zining diametri va oqsil tarkibi jihatidan bir-biridan farq qiladi. Bir muncha yo'g'onroq iplar (diametri $100-110 \text{ \AA}^0$) asosan miozin oqsildan tashkil topgan bo'lsa, bir muncha ingichkalari (diametri $40-50 \text{ \AA}^0$) aktin oqsildan tashkil topgandir.

Elektron mikroskopda olingan fotosuratlarda yo'g'on va ingichka iplarning o'zaro qat'iy bir tartib bilan joylashganligi, har bir yo'g'on ipning 6 ta ingichka ip bilan o'ralib turishi ko'zga tashlanadi. Ayni vaqtda ikkita qo'shni yo'g'on ip o'rtasida bir juft ingichka ip bo'ladi (qo'shaloq geksogonal panjara).

Miozin va aktin iplarida ko'ndalang ko'prikchalar ko'rinishida yon birikmalar bor, bular orasi taxminan $60-70 \text{ \AA}^0$ keladigan miozin iplari o'simtalaridan hosil bo'lgan. O'sha ko'prikchalar yo'g'on ipni qo'shni oltita ingichka ipning har biri bilan birlashtiradi va o'ramlari har 400 \AA^0 dan keyin takrorlanadigan spiral bo'ylab joylashadi, shu narsa miofibrillarning struktura jihatdan yaxlit bo'lishini ta'minlab beradi.

Tinch holatdagi muskulda ko'prikchalar aktin bilan o'zaro ta'sirlashmaydi. Muskul qisqarganda I disk torayadi. A-disk uzunligi