

M Ü H A Z I R Ə 4

MEXANIKANIN NYUTONDAN SONRAKI İNKİŞAFI

Nyuton tərəfindən mexanikanın əsas anlayışları və qanunları verildikdən sonra, mexanika bir neçə istiqamətdə inkişaf etməyə başladı.

İlk növbədə, “sürətlənmiş qüvvələr” (bu prinsip Laqranj tərəfindən belə adlandırılmışdır) prinsipinə əsaslanan analitik aparatın yaradılması istiqamətini nəzərdən keçirək. Bu istiqamət maddi nöqtənin, maddi nöqtələr sisteminin, və ya bərk cismin tətbiq olunmuş qüvvələr altında hərəkətini təyin etmək üçün, və ya əksinə, verilmiş hərəkət əsasında qüvvələrin təyin edilməsində Nyutonun II qanunundan istifadə edilməsini nəzərdə tutur. Nyuton tərəfindən məhz bu yönümdə məsələlər həll edildiyinə baxmayaraq, o həmin məsələlərin həlli üçün analitik aparatı yarada bilməmişdir. Nyuton bunun üçün differensial və inteqral hesabının analitik aparatından deyil, həndəsi metoddan (üsuldan) istifadə etmişdir. Bu o deməkdir ki, hər hansı bir hərəkəti qiymətləndirmək üçün Nyuton onu kiçik həndəsi hissələrə bölür.

Sürətlənmiş qüvvələr prinsipinə əsaslanan analitik aparatın yaradılmasında Peterburq akademiki Leonard Eylerin rolu böyükdür. Milliyyətə isveç olan Eyler (1707-1783) Peterburq Elmlər Akademiyasının ilk akademiki olmuş, 1727-1741-ci illər Rusiya elminin inkişafına təkan vermiş, lakin Rusiyada o dövrdə baş verən siyasi vəziyyət onu akademiyanı tərk etmək məcburiyyətində qoymuşdu. 1741-ci ildə Eyler Almaniyaya gedir, lakin Rusiyada vəziyyət stabilləşən kimi 1766-cı ildə Peterburqa qayıdır və ömrünün sonuna kimi orada yaşayır. 1736-cı ildə onun 2 tomluq “Mexanika” kitabı, 1745-ci ildə isə “Bərk cisimlərin hərəkət nəzəriyyəsi” kitabı çapdan çıxır. Hər 2 kitab onun mexanika sahəsində şəxsi təcrübələri əsasında yazılmışdır. Lakin Nyutondan fərqli olaraq Eyler hesab edir ki, ixtiyari qarşılıqlı təsir sonda kontakta çevrilməlidir və qüvvələrin mahiyyəti (məğzi) materiyanın əsas xassələrində - ətalətdə və qeyri-keçiriciliyində cəmlənib. 2 cisim bir-birinə qarşı hərəkət etdikdə və bir-biri ilə toqquşduqda, bir tərəfdən qeyri-keçiricilik, digər tərəfdən isə öz hərəkətini saxlamaq cəhdi nəticəsində, onların hərəkəti dəyişəcək.

Eyler tərəfindən maddi möqtə mexanikasının analitik aparatı yaradıldı. İlk öncə Eyler maddi nöqtənin düzxətli hərəkəti üçün differensial tənlik yazdı:

$$F = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Əgər x funksiyasının F qüvvəsi məlumdursa, bu tənliyi verilmiş ilkin qiymətlərə görə inteqqallasaq, məsələni həll etmiş olarıq. Daha sonra Eyler maddi nöqtənin bütün hərəkətlərini biruzə verən məsələnin həlli ilə məşğul olur.

Ümumiyyətlə, Eyler bərk cisimlər mexanikasının əsasını qoymuşdu. İlk dəfə olaraq o, bərk cismin hərəkət tənliyində onun adını daşıyan Eyler bucağından istifadə etmişdir. Məhz Eyler tərəfindən bərk cisim dinamikasının əsas anlayışları (ətalət momenti, və s.) mexanikaya gətirilmişdi.

Sürətləndirilmiş qüvvələr prinsipi əsasında yaradılmış mexanikanın analitik aparatı, elmin bu sahəsinin tələbini tam ödəyə bilmirdi. Ona görə də alimlər mexanikanın bütün məsələlərini həll edə biləcək ümumi metodlara söykənən analitik aparatın axtarılması üzərində işləməyə başladılar.

Bu axtarış nəticəsində mexanikanın daha bir istiqaməti – saxlanma qanunlarının tətbiqinə əsaslanan mexanika formalaşdı. Yeni istiqamətin formalaşmasına, artıq o dövrdə məlum olan aşağıdakı saxlanma qanunları təkan vermişdi:

1. Dekart tərəfindən müəyyən edilən “hərəkət miqdarının saxlanma” qanunu;
2. “Canlı qüvvələrin saxlanması” qanunu, və ya müasir fizika dilində desək “enerjinin saxlanması” qanunu (Qaliley; ümumi halda isə Leybnis);
3. 1746-cı ildə təqribən eyni vaxtda həm Eyler, həm də D.Bernulli tərəfindən fırlanma hərəkətinin nəzəriyyəsi öyrənilərkən daha dəqiq müəyyən edilən “hərəkət miqdarı momentinin” saxlanma qanunu.

Analitik mexanikanın inkişafına təkan verən digər istiqamət hərəkət məsələlərini tarazlıq məsələlərinə gətirməyə cəhd göstərilməsi nəticəsində yarandı. Burada ilk addım Yakobi Bernulli (1654-1705) tərəfindən atıldı. O, fiziki rəqqasın rəqs məsələsini tarazlıq məsələləri ilə eyniləşdirdi. Eyni prinsip 1716-cı ildə German tərəfindən də irəli sürülmüşdür.

Nəhayət, 1743-cü ildə fransız fiziki və filosofu Jan Dalamber (1717-1783) “Dinamika” kitabını çap elətdirir ki, burada o digər prinsipi – dinamika məsələlərini statika məsələləri ilə eyniləşdirmək prinsipini irəli sürür. Dalamber dinamikanı hərəkət kimi qəbul edirdi və sürətləndirilmiş qüvvələr prinsipinə əsaslanan Nyuton mexanikasına mənfi yanaşırdı. O, hesab edirdi ki, mexanikadan qüvvələr anlayışı götürülməli, yalnız hərəkət anlayışları mexanikanın əsasını təşkil etməlidir. Ona görə də Dalamber Nyutonun II qanununu “ümumiyyətlə” düzgün hesab etmirdi (qanun kimi qəbul etmirdi). Onun fikrincə mexanikanın əsasını ətalət qanunu, hərəkətlərin toplanılması qanunu və tarazlıq prinsipi təşkil etməlidir.

Dalamber tərəfindən irəli sürülən prinsip sonradan tarixə “itirilmiş qüvvələr” prinsipi kimi düşdü. Dalamber (1742) mexanikanı bir-biri ilə əlaqəli olan ümumi sistem kimi qəbul edirdi və qeyd edirdi ki, sistemə tətbiq edilmiş real qüvvələrlə, sistem ona qüvvələr tətbiq edilmədikdə belə eyni hərəkəti icra etmək üçün lazım olan qüvvələr arasında ekvivalentlik mövcud olmalıdır. Bu o deməkdir ki, mexaniki sistemdə bir-biri ilə bağlı (əlaqəli) təsir qüvvələri, ümumiyyətlə, məlum olmadığı üçün, onları nəzərə almamaq olar. Məhz bu ideya Dalamber prinsipinin mahiyyətini təşkil edir. Buradan o alınır ki, dinamikanın hər bir məsələsi müəyyən mənada tarazlıq məsələlərinə, yəni statikaya gətirilə bilər.

Mexanikanın sonrakı inkişafı Jozef Laqranjın (1736-1813) işlərində öz əksini tapır. Laqranj öz qarşısına məqsəd qoyur ki, mən elə bir mexaniki aparat yaratmalıyam ki, onunla ixtiyari mexaniki məsələni differensial tənliklərin həllinə gətirmək mümkün olsun. Laqranj statikanın əsasına bütün mümkün yerdəyişmələri daxil etdi və məsələləri həll etmək üçün riyazi aparat yaratdı. O, dinamika “dinamika məsələlərini German-Eyler formalı statika məsələlərinə gətirmək” prinsipini daxil etdi. Bu prinsipdən istifadə etməklə ixtiyari mexaniki məsələ riyazi məsələyə çevrilir. Laqranjın riyazi talantı ona öz məqsədinə çatmağa kömək edir və o, hal-hazırda klassik fizikanın əsasını təşkil edən Laqranj tənliyini yaradır:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

$L=T-U$ – Laqranj funksiyasıdır; o laqranjian adlanır, q_i - ümumiləşmiş koordinatlar, T – canlı qüvvə, U – koordinatlar funksiyasıdır (sonradan potensial enerji adlandırıldı).

MEXANİKADA VARIASIYA PRİNİPLƏRİNİN İNKİŞAFI

Müəyyən vaxtlara qədər bizim yuxarıda qeyd etdiyimiz prinsiplər mexanikanı qane edirdi. Bu prinsiplər mexanikanın qeyri-variəsiya prinsipləri adlanır. Bu prinsiplər sistemə tətbiq edilən qüvvələrin təsiri nəticəsində onlarda baş verən hərəkət qanunauyğunluqlarını müəyyən etməyə kömək edirdi. Bu prinsiplərə Nyutonun II qanunu, və həmçinin, Dalamber prinsipi daxildir. Mexanikanın qeyri-variəsiya prinsipləri ancaq sərbəst sistemlərdə özünü doğruldu. Qeyri-sərbəst sistemlərə (bunlara yerüstü avtonəqliyyat, müxtəlif mexanizmləri və s. aid etmək olar) isə bu prinsipləri şamil etmək olmur.

Variəsiya prinsiplərinin məzmunu ondan ibarətdir ki, onlar verilmiş qüvvənin təsiri altında mexaniki sistemin faktiki (həqiqi) hərəkətini digər kinematik hərəkətlərdən ayıra bilirlər, yəni xassələri (əlamətləri) müəyyən edirlər. Əsasən bu xassələr (əlamətlər) ondan ibarətdir ki, həqiqi hərəkətdə sistemin xarakteristikalarından asılı olan bəzi fiziki göstəricilər bütün baxılan mümkün kinematik hərəkətlərlə müqayisədə, daha kiçik qiymətə malik olur. Bu halda variəsiya prinsipləri fiziki göstəricinin növünə və baxılan mümkün kinematik hərəkətlərin xüsusiyyətlərinə görə bir-birindən fərqlənirlər.

Formasına görə variəsiya prinsiplərini 2 qrupa ayırmaq olar: differensial və inteqral. əsas differensial variəsiya prinsipinə aşağıdakılar daxildir:

- Movcud yerdəyişmələr prinsipi; bu prinsipə əsasən mexaniki sistemin tarazlıq vəziyyəti digər mümkün vəziyyətlərdən onunla fərqlənir ki, məhz tarazlıq vəziyyətində sistemə tətbiq olunan bütün elementar işlərin cəmi sistemin ixtiyari yerdəyişməsində sıfıra bərabərdir.
- Dalamber-Laqranj prinsipi; bu prinsipin mahiyyəti ondan ibarətdir ki, ideal cəhətcə bir-biri ilə bağlı olan elementlərdən ibarət mexaniki sistemin həqiqi hərəkəti digər mümkün kinematik hərəkətlərdən onunla fərqlənir ki, yalnız həqiqi hərəkətdə hər an sistemə təsir edən aktiv, reaktiv və ətalət qüvvələrinin elementar işlərinin cəmi sistemin mümkün yerdəyişmələrində sıfıra bərabərdir.

Qeyd etdiyimiz variəsiya prinsiplərində baxılan fiziki kəmiyyət qüvvələrin işindən ibarətdir.

İnteqral variəsiya prinsiplərinə kiçik (stasionar) təsirlər prinsipi daxildir. Bu prinsipə əsasən sistemin mümkün kinematik hərəkətləri içərisində həqiqisi odur ki, sistemin 2 vəziyyəti arasında hərəkət kimi qiymətləndirdiyimiz fiziki kəmiyyət ən kiçik (minimal) qiymət alsın.

“Kiçik təsirlər” prinsipi Piyer Mopertyu (1698-1759) tərəfindən irəli sürülmüşdür.

Variəsiya prinsiplərinin sonrakı inkişafı Vilyam Hamiltonun (1805-1865) adı ilə bağlıdır. Hamiltonun “kiçik təsirlər” prinsipini aşağıdakı kimi formalaşdırmaq olar: **maddi nöqtənin həqiqi hərəkətinin zamanın ilkin və son vəziyyətlərindəki trayektoriyası, yəni 2 məlum nöqtələrindən keçən S yerdəyişməsi həmin nöqtələrdən keçən ixtiyari virtual hərəkətlərlə müqayisədə kiçik kəmiyyətlə xarakterizə olunurlar.**

Soruşa bilərsiniz ki, variəsiya prinsiplərinin fizikanın inkişafında rolu nədən ibarətdir? Bu suala aydınlıq gətirək. İlk əvvəl onu qeyd edək ki, variəsiya prinsiplərinin üstünlüyü ondan ibarətdir ki, bunlar əsasında ixtiyari mürəkkəb sistem üçün yalnız bir

üsuldan istifadə etməklə hərəkət tənliyini vermək olar. Sonralar məlum olub ki, variasiya prinsiplərini fizikanın digər bölmələrinə də - elektrodinamikaya və nisbilik nəzəriyyəsinə tətbiq etmək olar. XIX əsrin sonundan başlayaraq variasiya prinsipləri, xüsusilə “kiçik təsir” prinsipi fizikada böyük rol oynamaqla yanaşı, ümumfiziki prinsipə çevrildi. Məlum oldu ki, bu prinsip ilə əksər ümumi fiziki nəzəriyyələrin əsas qanunlarını sadə və başadüşüləcək riyazi formada vermək olar.

Bütün variasiya prinsipləri içərisində tənliklərin Hamilton forması ona görə daha üstün hesab edilir ki, onu çoxzərrəcikli sistemlərə və statistik mexanikaya çox rahatlıqla tətbiq etmək mümkündür.

Variasiya prinsiplərinin inkişafında amerikalı fizik Cozayl Villard Gibsin (1839-1908) rolunu xüsusi qeyd etmək lazımdır. Onun irəli sürdüyü faza və fəza anlayışları variasiya prinsiplərinin yazılışını daha da sadələşdirdi.

Hamilton tərəfindən 1843-cü ildə “kvaternionlar” anlayışının (kompleks ədədinin ümumiləşmiş adı), 1847-ci ildə isə “vektor” termininin daxil edilməsi mexaniki qanunların riyazi ifadəsinin sadələşməsinə səbəb oldu. Daha sonra alman riyaziyyatçısı German Qrosman (1809-1877) vektor hesabı əməliyyatının əsasını qoydu.

BÜTÖV MÜHİTLƏR MEXANİKASININ PROBLEMİ

Maddi nöqtələr sistemi mexanikasının ideyaları bütöv mühitlər (bura mayelər, qazlar, bərk cisimlər daxildir) mexanikasında da öz tətbiqini tapdı; hidrodinamika, qaz dinamikası, və həmçinin, aerodinamika və elastiklik nəzəriyyələri yaradıldı. Maye axınının ilk riyazi modeli Eyler tərəfindən irəli sürüldü. O, 1755-ci ildə onun adını daşıyan tənliklər sistemini yaratdı ki, bu tənliklərdən müasir ideal mayelər mexanikasında hal-hazırda geniş istifadə olunur.

Bütöv mühitlər mexanikası dedikdə, ilk növbədə, hidrodinamika nəzərdə tutulur. Çünki hidrodinamikada maye və qazları quruluşu olmayan bütöv mühit kimi qəbul edirlər. Kinetik nöqtəyi-nəzərinə bu o deməkdir ki, hidrodinamikada maye həcmnin ixtiyari kiçik elementi, tərkibi çoxlu sayda molekulardan ibarət böyük ölçülü qəbul olunur (yəni “fiziki sonsuz kiçik həcmdən” söhbət gedir ki, bu həcm mayenin bütöv həcmi ilə müqayisədə kiçik olsa da, molekullararası məsafələrlə müqayisədə çox böyük həcm hesab olunur).

Hidrodinamika tənlikləri sisteminin əsasında saxlanma qanunları – maye kütləsinin saxlanması qanunu (kəsilməzlik tənliyi), impulsun saxlanması qanunu (hərəkət tənlikləri), və enerjinin saxlanması qanunu durur. Bu tənliklərdə özlülük effektləri ilk dəfə bir-birindən xəbərsiz fransız fiziki Navye (1785-1836) tərəfindən 1822-ci ildə, 1845-ci ildə isə ingilis fiziki və riyaziyyatçısı Stok (1819-1905) tərəfindən nəzərə alınmağa başlandı. Ona görə də özlü mayenin hərəkət tənliyi onların adını daşıyır.

Bütöv mühitlər mexanikasının inkişafının pik nöqtəsi aerodinamika hesab olunur. Rusiyada aerodinamika “rus aviasiyasının atası” sayılan N.E.Jukovski (1847-1921) və onun tələbələri S.A.Çaplıgin (1869-1942), V.P.Vetçinkin (1888-1950), A.N.Tipolev (1888-1972) tərəfindən inkişaf etdirilmişdir.

Mayenin stasionar hərəkəti və stasionar axını məsələlərinin həlli hidrodinamikada dayanıqlılıq probleminə gətirib çıxartdı.

Fizikada xarakterinə görə maye və qazların hərəkətinin 2 növünü ayırd edirlər: laminar (sakit və hamar) və turbulent. Laminar axını, əsasən, nazik kapilyarda, və ya özlü mayelərdə (məsələn, duru yağda) müşahidə etmək olar. Turbulent hərəkət isə dayanıqlılıq itən zaman mövcud olur və bu hərəkəti əksər hallarda təbiətdə (atmosferdə, çaylarda, dənizlərdə), laboratoriya şəraitində (məs, plazmada), texnikada (neftin borularla daşınmasında), kimya sənayesində və s. müşahidə etmək mümkündür. Laminar hərəkətdən turbulent hərəkətə keçid ancaq böyük sürətlərdə mümkün olur və burada mayenin, və ya qazın keyfiyyət xarakteristikaları – sıxlığı və özlülüyü mühüm rol oynayır. Bu xarakteristikaları ingilis fiziki Osborn Reynolds (1842-1912) 1883-cü ildə “Reynolds ədədi” adlanan ölçüsüz ədəddə birləşdirdi. Reynolds ədədinin kiçik qiymətlərində hərəkət laminar olur. Bu ədəd kritik həddi keçdikdə isə, axın turbulenta çevrilir. Turbulentlik 2 qüvvənin - ətalət və özlülük qüvvələrinin qarşılıqlı mübarizəsinin nəticəsidir. Ətalət qüvvələri maye zərrəciklərini bir-biri ilə toqquşdurur, özlülük qüvvələri isə zərrəciklərin bir-birinə nəzərən yerdəyişmələrini tormozlamaqla, qeyri-müntəzəm hərəkəti tənzimləməyə çalışır. Ətalət qüvvələri özlülük qüvvələrini üstələyəndə turbulentlik baş verir. Turbulentliyin ən xarakterik əlaməti ondan ibarətdir ki, fəzanın müxtəlif nöqtələrində hərəkət edən mayenin parametrləri – sürətləri, təzyiqləri, sıxlıqları və s. bir-birindən fərqli olur. Parametrlərdəki bu fluktuasiyaların (dəyişkənliklərin) olması, mayədə bütün axın boyu müxtəlif ölçülü burulğanların yaranması, onların öz yerlərini dəyişməsi və sönmələrinin nəticəsidir.

MÜASİR KLASSİK MEXANİKA

Nisbilik və kvant nəzəriyyələri yaradııldıqdan sonra Nyuton tənliklərinə və onun ümumiləşmiş fəzalarına əsaslanan klassik mexanikanın tətbiq sahələri məlum oldu. Bu sərəhd (çərçivə) daxilində bir çox praktik məsələlərin həllində klassik mexanika nəhəng gücə malikdir. Belə ki, kosmik gəmilərin uçuşu da klassik mexanikanın metodları hesabına mümkün olmuşdur. Hər bir elm kimi mexanika da bəzi anlayışlara söykənir. Müasir klassik mexanikanın söykəndiyi əsas anlayışlar aşağıdakılardır:

1. **Fəza.** Fəza bircins, üçölçülü və ekvivalentdir. O heç bir fiziki obyektədən, xüsusilə də kütlədən asılı deyil.
2. **Zaman.** Zaman birölçülüdür¹. O bütün sistemlərdə eynidir və ölçü aparıldığı cismin sürətindən asılı deyil.
3. **Ətalət.** Ətalət sistemi adlanan heç olmasa 1 hesablama sistemi var ki, orada Nyutonun II qanunu özünü doğruldur.
4. Əşyanın əsas xarakteristikası olan **kütlə**, onun hərəkət sürətindən və hazırlandığı maddədən asılı olmayıb, həmişə sabit qalır.
5. **Qüvvə.** Qüvvə əşyaların qarşılıqlı təsirlərinin nəticəsi olub, onların deformasiyasına, və ya sürətlənmələrinə səbəb olur.

¹ 1967-ci ildə keçirilən “Ölçü və kütlə” üzrə 13-cü Ümumiləşmiş konfransın qətnaməsinə əsasən 1 saniyə olaraq o müddət götürülür ki, bu zaman kəsiyində Seziüm-133 metalının əsas halının 2 ifrat nazik səviyyələri arasında keçid zamanı 9 192 631 770 dövr şüalanma baş versin.

6. **Səbəbiyyət prinsipi.** Mexaniki sistemin dinamik dəyişənlərinin verilməsi, bir mənalı olaraq, sistemin bütün hərəkətini müəyyən edir.

İndi isə klassik mexanika qanunlarının tətbiq edilmədiyi sərhədləri yada salaq. Hal-hazırda yalnız 3 halda klassik mexanika qanunları öz mahiyyətini itirir:

- Mikro dünyada. Belə ki, mikro dünyanın xassələri klassik mexanika çərçivəsində başa düşülmür. Xüsusilə də, termodinamika ilə birləşən klassik mexanika qanunlarını mikro aləmə tətbiq etdikdə, bir-birinə zidd nəticələr alınır. Atom və subatom zərrəciklərinin xassələrini başa düşməyə imkan verən adekvat dil kvant mexanikası hesab olunur. Klassik mexanikadan kvant mexanikasına keçid təkcə hərəkət tənliklərinin dəyişməsindən ibarət olmayıb, bütün fiziki anlayışların tamamilə yenidən qurulması deməkdir.
- Işıq sürətinə yaxın sürətlərdə. Burada da klassik mexanika qanunları işləmir. Bunun üçün xüsusi nisbilik nəzəriyyəsinə müraciət etmək lazımdır. Əgər biz bu halda da hərəkət tənliyini $F=ma$ şəklində gətirmək istəsək, onda həmin tənliyə kütlə tenzoru daxil etməliyik. Bunun da öz çətinlikləri var. Belə ki, sürət artdıqca tenzorun komponentlərinin sayı da artır ki, bu da öz növbəsində, çoxkomponentli tənliklər sisteminin həl edilməsi zərurətini yaradır. Bu cür yanaşma uzun müddətdir ki, alimlər arasında mübahisəyə səbəb olduğu üçün, ondan istifadə edilməsi məqsədəuyğun hesab olunmur.
- Çoxlu sayda zərrəciklərdən ibarət olan sistemlərdə. Bu halda da klassik mexanika qanunlarından istifadə edilməsi qeyri-effektiv olur. Bu zaman statistik fizikaya keçid məqsədəuyğun sayılır.

Mühazirə 4-ə aid imtahan sualları

1. Mexanikanın Nyutondan sonrakı inkişafı
2. Sürətlənmiş qüvvələr prinsipinə əsaslanan analitik aparatın yaradıcıları
3. Sürətlənmiş qüvvələr prinsipinə əsaslanan analitik aparatın yaradılmasında Peterburq akademiki Leonard Eylərin rolu
4. Saxlanma qanunlarının tətbiqinə əsaslanan mexanika
5. Analitik mexanikanın inkişafında Bernullinin rolu
6. Dinamika məsələlərini statika məsələləri ilə eyniləşdirmək prinsipini irəli sürən Dalmberin mexanikaya verdiyi tövə
7. Jozef Laqranjin mexanikanın sonrakı inkişafında rolu
8. Mexanikada qeyri-variantasiya prinsipləri
9. Mexanikada variantasiya prinsipləri
10. Differensial variantasiya prinsipinin əsasları
11. İnteqral variantasiya prinsipləri nədir?
12. Variantasiya prinsiplərinin inkişafında Vilyam Hamiltonun nailiyyətləri
13. Variantasiya prinsiplərinin fizikanın inkişafında rolu
14. Bütöv mühitlər mexanikası
15. Müasir klassik mexanika
16. Klassik mexanika qanunlarının tətbiq edilmədiyi sərhədlər