

ЖОҒАРЫ БІЛІМ

Ахметов А.Қ., Үмбетов Ә.Ү.

ФИЗИКА КУРСЫ

I ТОМ

МЕХАНИКА

Оқулық

Редакциясын басқарған техн.ғыл.канд.
Ахметова Ә.А.

Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігі
бекіткен стандарт бойынша жазылған

Астана – 2018

ӘӨЖ 531 (075)
КБЖ 22.2я73
А 94

Пікір жазғандар:

Ақылбеков Ә.Т. – Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің, физика-техникалық факультетінің деканы, ф.-м.ғ.д., профессор
Мұратов Ә.М. – т.ғ.д., профессор (Қазақ қатынас жолдары университеті)

Ахметов А.Қ., Үмбетов Ә.Ү.

А94

«Физика курсы». I том. Механика. Оқулық. Жоғары оқу орындарының бакалавр мамандығының студенттеріне арналған / Ахметов А.Қ., Үмбетов Ә.Ү. Астана – 2018 ж. – 533 бет.

ISBN 978-601-7875-61-9

Бұл оқулықта физика курсының механика деп аталатын бөлімінің физикалық негіздері баяндалған. Авторлар оқулықты жазу барысында жалпы физика курсының жоғары оқу орындарына арналған типтік бағдарламасына негіз етіп алған.

Механиканың негізгі идеялары инерциялық және инерциялық емес санақ жүйелері тұрғысынан және векторлық алгебраның элементтерін пайдалану арқылы баяндалған.

Оқулық жоғары оқу орындарының студенттеріне арналған.

ӘӨЖ 531 (075)
КБЖ 22.2я73

Қазақ қатынас жолдары университетінің ғылыми әдістемелік кеңесі бекітіп және баспаға ұсынған, №5 хаттама 29.12.2017 ж. және Ы.Алтынсарин атындағы Арқалық педагогикалық институтының ғылыми әдістемелік кеңесінде де қаралып, баспаға ұсынған, №4 хаттама 17.12.2017 ж.

Бұл басылымның түп нұсқа-үлгісі авторлардың жеке меншігі. Меншік иесілерінің келісімінсіз кітапты, кітаптың беттерін немесе оның бөліктерін көбейтуге болмайды. Авторлық құқық Қазақстан Республикасының заңымен қорғалады.

© Ахметов А.Қ.,
Үмбетов Ә.Ү.

ISBN 978-601-7875-61-9
ISBN 978-601-7875-62-6

СЕГІЗІНШІ ТАРАУ

ИНЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС САНАҚ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ҚОЗҒАЛЫС

8.1. Инерциялық емес санақ жүйелері және олардың түрлері

Біз осы уақытқа дейін денелердің механикалық қозғалыстарын инерциялық санақ жүйелерінде қарастырып келдік. Былайша алып қарағанда, көпшілік жағдайда, денелердің механикалық қозғалыстарын инерциялық емес санақ жүйесіне қатысты қарастыруға тура келеді. Сонымен, мысалы, Жердегі денелердің қозғалысына, қойылатын қатаң талапқа сүйеніп, инерциялық емес лабораториялық (зертханалық) санақ жүйесінде жүреді деп қарастырайық. Бірақ, біз бірінші тарауда Жерде бірінші жуықтауларда (қараңыз: Кинематика. 1.5. Галилей түрлендірулері) инерциялық деп есептеген болатынбыз. Алайда, мұндай болжамдардың арнайы негіздеулері болуы қажет, себебі, өлшеулер нәтижесінде, біршама қателіктер байқалатыны сөзсіз. Мысалы, поездің солтүстік жарты шарда меридианалық бағытпен қозғалысы кезінде, оның сол жақтағы рельсінен гөрі, оң жақтағы рельс көбірек қажалатындығы; маятниктің тербеліс жазықтығының «өздігінен» бұрылуы (Фуко тәжірибесі); меридиан бағытымен ағатын өзеннің бір жақ жағасының жуылуы; еркін түскен дененің шығысқа арай ауытқуы т.б. Міне, осының бәрі Жерге қатысты санақ жүйесінің инерциялық еместігінің дәлелі.

Ньютонның заңдары орындалмайтын санақ жүйелерін *инерциялық емес* деп атайды. Мұнда инерцияның заңдары орындалмайды, себебі инерциялық емес санақ жүйесінде бір денеге басқа дене әсер етпесе де, ол өзінің тыныштық күйін немесе бірқалыпты түзу сызықты қозғалысын сақтамайды. Дене үдеу алу үшін басқа бір дене оған әсер етуі керек, ал мұнда ондай әсер жоқ болса да, дене үдеу алады, ендеше Ньютонның екінші заңы орындалмайды. Ең соңында айтарымыз, мұнда Ньютонның үшінші заңы да орындалмайтындығын байқауға болады, өйткені, денеге әсер ететін инерция күшіне қарсы әсер болмайды (себебі осы қарсы әсердің түсірілетін денесі жоқ).

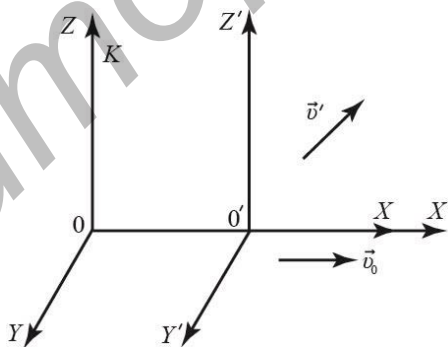
Инерциялық жүйеге қатысты бір қалыпты және түзу сызықты қозғалатын санақ жүйесі инерциялық болып табылады.

Қандай да болмасын инерциялық жүйеге қатысты үдеумен қозғалатын кез-келген санақ жүйесі **инерциялық емес** болады. Инерциялық емес санақ жүйелерін екі түрге бөледі. Оның бірі инерциялық жүйеге қатысты жүйенің тұрақты немесе айнымалы үдеумен ілгерлемелі қозғалысы, ал екіншісі – белгілі бір өске немесе белгілі бір центрге қатысты тұрақты немесе айналмалы бұрыштық жылдамдықпен жүйенің айналмалы қозғалысы.

Жүйенің өз еркімен қозғалысын барлық уақытта екі қозғалыстың қосындысы түрінде қарастыруға болады.

8.2. Түзу сызықты қозғалатын инерциялық емес санақ жүйесі

Қозғалмайтын координаталар жүйесі (инерциялық) K (X, Y, Z) және оған қатысты үдей қозғалатын K' (X', Y', Z') екі жүйені қарастырайық (8.1-сурет). Айталық, бұл қозғалыс \vec{v}_0 жылдамдығымен X өсі бойымен жүреді деп есептейік.



8.1

Егер дененің қозғалатын жүйеге қатысты жылдамдығы \vec{v}' болса, онда оның қозғалмайтын жүйеге қатысты жылдамдығы мынаған тең:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0. \quad (8.1)$$

Олай болса, қозғалмайтын жүйеге қатысты үдеу үшін мына теңдікті жазуға болады:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{v}_0}{dt} = \vec{a}' + \vec{a}_0, \quad (8.2)$$

мұндағы \vec{a}' – K' жүйесіне қатысты дененің үдеуі, \vec{a}_0 – K инерциялық санақ жүйесіне қатысты K' жүйесінің үдеуі.

Инерциялық координаталар жүйесінде Ньютонның екінші заңы бойынша

$$m\vec{a} = \vec{F}, \quad (8.3)$$

мұндағы m – дененің массасы, \vec{F} – берілген денеге әсер ететін барлық дененің қорытқы күші. Жоғарыда айтылғандарымызға сәйкес, инерциялық емес санақ жүйесі үшін сол дененің қозғалыс теңдеуін мына түрде жазамыз:

$$\vec{F}' = m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{ин}, \quad (8.4)$$

мұндағы \vec{F}' – инерциялық емес жүйеде әсер ететін күш, $\vec{F}_{ин}$ – инерциялық емес санақ жүйесінің салдарынан әдеттегі \vec{F} күшіне қосылатын, инерция күші. (8.2) және (8.3) теңдеуін негізге ала отырып, соңғы өрнекті мына түрде қайта жазамыз:

$$m\vec{a}' = \vec{F} - m\vec{a}_0. \quad (8.5)$$

Сонымен, түзу сызықты қозғалатын инерциялық емес санақ жүйесінің қорытқы инерция күші үшін мынаны жазамыз:

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}_0. \quad (8.6)$$

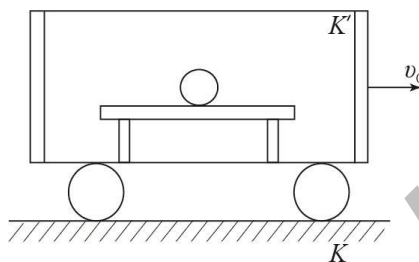
Әрқашанда, инерция күшін есептеген кезде, кез-келген санақ жүйесіндегі (инерциялық болсын, инерциялық емес болсын) дененің қозғалысы бір ғана теңдеумен сипатталады. Айтқанымызды келесі мысалмен түсіндірейік. Айталық дене K жүйесіне қатысты бастапқы мезетте тыныштықта болсын дейік. Денеміз өте мұқият жылтыр горизонталь бетте жатқан шарик болсын деп болжайық (8.2-сурет). Егер K' қозғала бастаса, онда K жүйесіндегі бақылаушы үшін, шарик бұл қозғалысқа қатыспаған болып шығады, сол себептен ол тыныштықта немесе оған ешқандай күш әсер етпегендей болады. Демек,

$$m\vec{a} = \vec{F} = 0.$$

K' жүйесімен бірге қозғалатын бақылаушы үшін шарик \vec{v}' жылдамдығымен үдей қозғалады. Сондықтан K' жүйесіндегі

бақылаушы шарикке күш әсер етіп тұр деп қорытынды жасайды, яғни

$$\vec{F}' = m\vec{a}'.$$



8.2

(8.5) теңдеуіне $\vec{F} = 0$ мәнін қойғанда алатынымыз:

$$\vec{F}' = -m\vec{a}_0,$$

мұндағы \vec{a}_0 – K жүйесіне қатысты K' жүйесінің үдеуі. Алайда, бұл бақылаушы денелердің өзара әсеріне байланысты болатындай ешқандай да күш әсер етпейді деп есептейді. Сондықтан да, ол оның жүйесі үдеуі $-\vec{a}_0$ болатын белгісіз күштің өрісіне тап болды деп болжайды. Бұл «өріс» шынында да K' жүйесінің үдей қозғалуы салдарынан пайда болған.

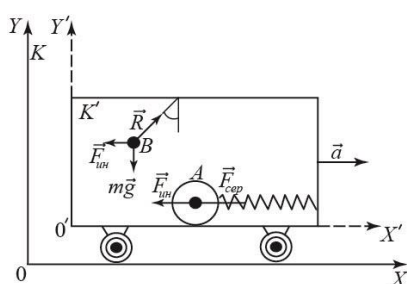
8.3. Инерция күшінің қасиеті

Инерция күші денелердің өзара әсер күштерінен тумаса да, үдемелі қозғалатын санақ жүйесінде орналасқан бақылаушы үшін, бұл күш, нақты болып саналады. Қандай да болмасын көлікте отырғанымызда, оның кенет тежелуінде, немесе тез жүріп кетуінде, біз өзіміздің өмір тәжірибемізден, олардың нақты екеніне көзіміз жетеді. Сол мезетте бізді алға немесе артқа итеретін күшті сеземіз. Бұл күштің сезілуі ауырлық күшін сезгендегідей болады.

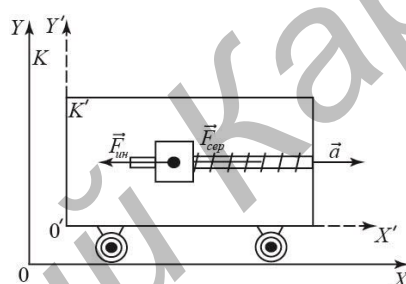
Жерде тұрған бақылаушы үшін, яғни инерциялық санақ жүйесінде, инерция күші болмайды. Денелердің тежелу кезіндегі немесе тез орнынан жұлқи қозғалуы кезіндегі алға еңкею мен артқа шалқаюды, Ньютонның бірінші заңымен- дененің өзінің

бірқалыпты қозғалыс күйін немесе тыныштық күйін сақтауы деп түсіндіріледі.

Бақылаушының жеке сезімімен мұны байланыстырмай-ақ, инерция күшінің нақты екенін көрсететін тәжірибені, K' санақ жүйесінің үдемелі қозғалысымен байланыстырып түсіндіруімізге де болады.



8.3



8.4

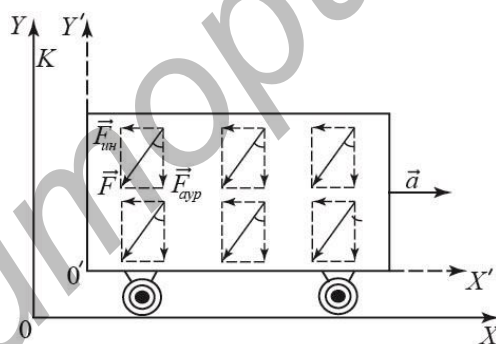
Ендеше сол вагонның үдемелі қозғалысына қайтадан көңіл аударайық. Егер бақылаушы вагонда тұрып (K' жүйесі), A шарын вагонның алдыңғы қабырғасына, жеңіл («салмақсыз») бекітілген серіппеге жалғаса, ал B шарын төбеге, жіңішке («салмақсыз») жіпке, ілсе (8.3-сурет), онда екі шарда үдемелі қозғалыс басталғаннан біршама уақыт өткеннен кейін қозғалыссыз болады деп, ол қорытындылайды. Бұл жағдайда серіппе белгілі бір шамаға ($\Delta x'$) созылған, ал жіп вертикальдан белгілі бір α бұрышына ауытқыған болып шығады. Алайда, серіппенің созылуы, ал жіптің вертикальдан ауытқуы тек шарларға нақты күштер әсер еткенде ғана орын алады. Үдей қозғалатын вагондағы бұл күштер инерция күштері болып табылады. Бұдан біздің байқайтынымыз инерция күштері, әдеттегі ньютон күштері секілді, денені деформациялайды (8.4-сурет), ілінген денені вертикальдан ауытқытады. Былайша айтқанда, онда әдеттегі күштер нені «істесе» олар да соны «істейді».

«Жер» жүйесіндегі бақылаушы серіппенің ұзаруын жүйедегі шардың \vec{a} үдеуімен қозғалуы, ол үшін күш қажет деп түсіндіреді. Бұл күш созылған серпімді серіппенің күші. B шарының вертикальдан ауытқуын, B денесінің үдемелі қозғалысы үшін күш керек, ол күшті шарға әсер ететін жіптің керілу күші мен

ауырлық күшінің қосындысы болатын қорытқы күш тудырады деп түсіндіреді.

Инерциялық емес жүйедегі сақталу заңы. Ньютон механикасында материялық нүктелер жүйесі үшін импульстың сақталу заңының тұйық жүйелер үшін дұрыс болатыны жөнінде біз білеміз, ал осы заң инерциялық емес санақ жүйесінде орындала ма?

Денелердің тұйық жүйесін алу үшін, инерция күшін тудыратын денені осы жүйеге қосуымыз керек. Мұндай дене жоқ. Сондықтан санақ жүйесінде үдемелі қозғалатын бірде-бір денелер жүйесі тұйық бола алмайды. Сонымен қатар біз жоғарыда инерция күші «жалған» күш – ол дененің үдемелі қозғалысынан тұрады, ал үдеу нөлге айналғанда жоғалып кетеді дегенбіз. Осы айтқандарымыздың негізінде, инерциялық емес санақ жүйесінде, импульстың сақталу заңының қолданылмайтындылығын еске саламыз.



8.5

Инерция күшінің өрісі. Инерциялық емес санақ жүйесінде әсер ететін инерция күші, күш өрісін тудырады. Шынында да, ілгерілеме қозғалатын жүйелер үшін, инерция күшінің өрісі біртекті болады. Мысалы, мұндай өрістің үдемелі қозғалатын вагонмен байланысты санақ жүйесінде тууы. Алайда, қозғалатын вагонның оның Жермен салыстырғандағы өлшемі өте аз шама болғандықтан, оны біртекті деп есептеуге болатын, инерция күш өрісінен басқа, ауырлық күш өрісі бар екенін білеміз. Бұл екі өрістер 8.5-суретінде пунктирмен бейнеленген. Суперпози-

ция принципі бойынша бұл екі өріс бір-бірімен қосылып, жаңа өріс – қорытқы өрісті түзеді. Ол массасы m денеге төмендегідей күшпен әсер етеді:

$$\vec{F} = \vec{F}_{аур} + \vec{F}_{ин} = m(\vec{g} - \vec{a}). \quad (8.7)$$

8.5-суретінде қорытқы өріс тұтас бағдар сызығымен көрсетілген.

Вагонда отырған бақылаушы, қорытқы өрісті тартылыс өрісінің өзгерісі деп қабылдайды.

8.4. Центрден тепкіш инерция күші

Енді K инерциялық жүйесіне қатысты, тұрақты $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдықпен айналатын, K' инерциялық емес санақ жүйесіндегі дененің жағдайын қарастырайық. Айналатын дискіге радиалдық бағыттаушыны бекітіп, оған дискінің өсіне серіппемен «байланған» шарикті өткіземіз (8.6-сурет). Диск айнамай тұрғанда серіппе деформацияланбайды. Дискіні айналдырған жағдайда, серіппе созылады, ол созылу \vec{F} серпімділік күші шариктің m массасының оның $\vec{a}_n = -\omega^2 \vec{R}$ үдеуіне көбейтіндісіне тең болғанға дейін орын алады (\vec{R} – дискінің центрінен шарикке дейін жүргізілген вектор, оның модулі K' жүйесінің айналу өсінен шарикке дейінгі R қашықтығын береді):

$$\vec{F}_{серп} = -m\omega^2 \vec{R} \quad (8.8)$$

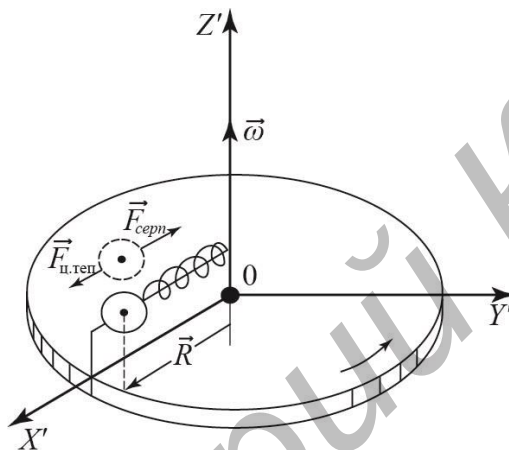
(\vec{R} – векторы айналу өсіне перпендикуляр).

Дискімен байланысты, K' санақ жүйесіне қатысты, шарик тыныштықта болады. Бұны K' жүйесінде, $\vec{F}_{серп}$ күшінен басқа, инерция күшінің әсер ететіндігімен формалды түрде түсіндіруімізге болады. Бұл күш дененің айналу өсінен радиустың бойымен бағытталады:

$$\vec{F}_{ц.теп} = m\omega^2 \vec{R}. \quad (8.9)$$

(8.9) өрнегімен анықталатын $\vec{F}_{ц.теп}$ күшін **инерцияның центрден тепкіш күші** деп атайды. Ол айналатын санақ жүйеле-

рінде пайда болады және дене осы жүйеде тыныш тұр ма, әлде оған қатысты \vec{v}' жылдамдығымен қозғала ма бәрі бір одан тәуелсіз болады. Бұл, әрине, (8.9) өрнегіне \vec{v}' жылдамдығының кірмеуінен шығады.



8.6

Сонымен, Жермен байланысқан санақ жүйесіндегі дененің жағдайын қарастырғанда инерцияның центрден тепкіш күшін дәл есептеулерде міндетті түрде есепке алу қажет. Бұл күш экваторда максималь болады, мұнда $R = 6,38 \cdot 10^6$ м. Тәулік ішінде Жер 2π бұрышқа 86400 с ішінде бұрылады. Демек, Жердің бұрыштық жылдамдығы

$$\omega_{жс} = 2\pi : 86400 = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с.}$$

(8.9) өрнегіне сәйкес массасы $m = 1$ кг болатын денеге, экваторда әсер ететін центрден тепкіш инерция күш

$$F_{ц.теп} = 1,00 \cdot (7,27 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 6,38 \cdot 10^6 = 0,0337 \text{ Н,}$$

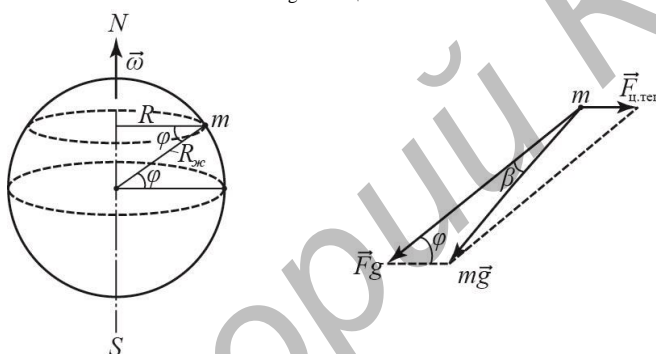
бұл 9,81 Н-ға тең $P = mg$ ауырлық күшінің $1/291$ бөлігін құрайды. Осыдан шығатыны: Жерге қатысты қозғалатын дененің инерциялық центрден тепкіш күшін бірқатар жағдайда ескермеуге болады. Дененің Жер бетінен қашықтығы онша үлкен болмаған жағдайда, R -дің орнына $R_{жс} \cos \varphi$ -ді ($R_{жс}$ – Жердің ра-

диусы, φ – тұрған орынның ендігі) алуға болады (8.7-сурет). Сонда инерцияның центрден тебу күші мына түрге келеді:

$$\vec{F}_{\text{ц.теп}} = m\omega_{\text{жс}}^2 R_{\text{жс}} \cos \varphi. \quad (8.10)$$

Демек, $\vec{P} = m\vec{g}$ ауырлық күші, Жердің тарту күші \vec{F}_g мен инерцияның центрден тепкіш $\vec{F}_{\text{ц.теп}}$ қорытқы күшінің қосындысы түрінде болады:

$$\vec{P} = \vec{F}_g + \vec{F}_{\text{ц.теп}}. \quad (8.11)$$



8.7

$\vec{P} = m\vec{g}$ күшінің бағыты жүкпен керілетін жіптің, былайша айтқанда, тіктеуістің бағытымен немесе вертикаль бағытпен сәйкес келу керек. 8.7-суретінде тіктеуістің бағыты Жердің центріне бағытталған бағытпен сәйкес келмей онымен β – бұрышын жасап тұр (Жер бетінде φ ендігінде орналасқан массасы m болатын дененің айналу өсінен қашықтығы $R = R_{\text{жс}} \cos \varphi$ -ге тең). Бұл бұрышты анықтау үшін үшбұрыштың қабырғаларының қатыстары оларға қарсы бұрыштардың синустарының қатысындай болады деген синустар теоремасын қолдансақ және β бұрышына қарсы $\vec{F}_{\text{ц.теп}}$ күшіне тең үшбұрыштың қабырғасы, ал φ бұрышына $m\vec{g}$ ауырлық күшіне тең үшбұрыштың қабырғасы жатқанын ескерсек, онда

$$\frac{\sin \beta}{\sin \varphi} = \frac{\vec{F}_{ц.теп}}{mg} = \frac{m\omega_{ж}^2 R_{ж} \cos \varphi}{mg} = \frac{\omega_{ж}^2 R_{ж} \cos \varphi}{g},$$

осыдан

$$\sin \beta = \frac{\omega_{ж}^2 R_{ж}}{2g} \sin 2\varphi$$

(мұнда $2 \sin \varphi \cos \varphi = \sin 2\varphi$ екендігі ескерілген). Соңғы өрнекке жоғарыда келтірілген мәндерді және $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ мәнді қойып есептесек, алатынымыз:

$$\sin \beta = 0,0018 \cdot \sin 2\varphi. \quad (8.12)$$

(8.12) теңдігінен тіктеуіштің ауытқуы 0-ден бастап (экваторда $\varphi = 0^\circ$ және полюске $\varphi = 90^\circ$) 0,018 рад дейін немесе $6'$ ($\varphi = 45^\circ$ ендікте) дейін.

$F_g - mg$ айырымы полюстерде нөлге тең де, экваторда максималдық шамасы, mg күшінің 0,3%-на тең болатын жағдайға жетеді. Жердің жаншылуына байланысты F_g күшінің өзі өздігінен ендікке байланысты өзгереді. Сондықтан ол полюсте экватордағыдан 0,2%-ға үлкен болады. Қорытындылай келгенде еркін түсу үдеуі ендікке байланысты $9,780 \text{ м/с}^2$ -тан экваторда $g = 9,832 \text{ м/с}^2$ -қа дейін өзгереді. Оның қазіргі таңдағы қабылданған стандарттық мәні $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$.

8.5. Кориолис күші

Айналатын санақ жүйесіне қатысты дененің қозғалысы кезінде центрден тепкіш күштен басқа **Кориолис күші** немесе **кориолистік инерция күші** деп аталатын тағы бір күш пайда болады (Гюстев Гаспар Кориолис (1792-1843 жж.) – механика саласындағы француз ғалымы).

Кориолистік күшті анықтаудың мысалын қарастырайық. Горизонталь орналасқан диск алайық. Ол вертикаль өс айналасында айналатын болсын. Дискіге OA радиалдық түзу сызық сызайық (8.8,а-сурет). Одан A -ға қарай \vec{v}' жылдамдығымен шарик жіберейік. Егер диск айналмай тұратын болса, онда шарик сызыл-

ған түзу бойымен домалайды. Егер дискіні суретте көрсетілгендей бағытпен айналдырсақ, онда шарик OB пунктир қисығы бойымен домалайды да, оның жылдамдығы \vec{v}' өзінің бағытын өзгертеді. Демек, айналатын санақ жүйесіне қатысты шарик өзіне, \vec{v}' жылдамдығына перпендикуляр \vec{F}_k күші әсер еткендей сезінеді. Айналып тұрған дискідегі радиалдық түзумен шарикті домалату үшін, бағыттаушы жасау керек, мысалы, ондай бағыттаушы OA қабырғасы түрінде болғаны дұрыс (8.8,ә-сурет). Енді шарик қозғалған кезде қабырға ол белгілі бір \vec{F}_r күшімен әсер етеді. Айналатын санақ жүйесіне (дискіге) қатысты шарик бағытталған тұрақты жылдамдықпен қозғалады. Мұны \vec{F}_r күшінің \vec{v}' жылдамдығына перпендикуляр, шарикке түсірілген \vec{F}_k инерция күшімен теңгерілетіндігімен түсіндіруге болады. Сонымен \vec{F}_k инерциялық Кориолис күші болып табылады. Кориолис күшінің өрнегін анықтайтын дербес жағдайды қарастырайық. Айталық, айналатын санақ жүйесімен салыстырғанда, массасы m болатын бөлшек шеңбер бойымен бірқалыпты қозғалсын дейік, ал шеңбердің центрі жазықтыққа перпендикуляр өтетін өстің бойында жатсын (8.9-сурет). Айналатын жүйеге қатысты нүктенің жылдамдығын \vec{v}' деп белгілейік. Қозғалмайтын (инерциялық) жүйеге қатысты материялық нүктенің жылдамдығы \vec{v} -ға тең де, ал оның шамасы $v' + \omega R$ (a жағдайы үшін) және $v' - \omega R$ (∂ жағдайы үшін), мұндағы ω – жүйенің айналу жылдамдығы, R – шеңбердің радиусы. Қозғалмайтын жүйеге қатысты нүкте $v' + \omega R$ жылдамдығымен қозғалу үшін оған центрге бағытталған \vec{F} күші әсер етуі керек, оны мысалы, шеңбердің центріне байланған нүктенің жібінің керілу күші деп есептеуімізге болады (8.9,а-сурет). Ол күштің шамасы мынаған тең:

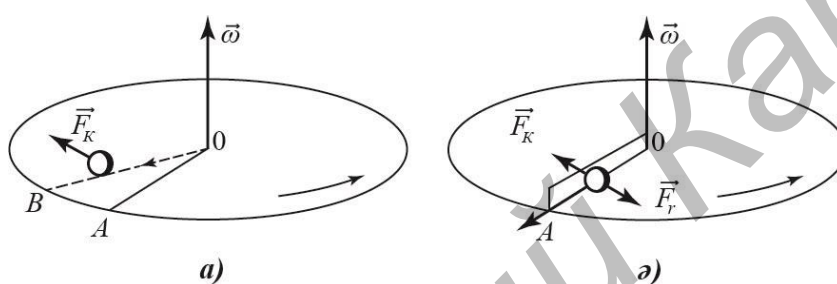
$$F = ma_n = \frac{mv^2}{R} = \frac{m(v' + \omega R)^2}{R} = \frac{mv'^2}{R} + 2mv'\omega + m\omega^2 R, \quad (8.13)$$

мұндағы F – центрге қарай бағытталған центрге тартқыш күш. Демек, бұл жағдайдағы нүкте айналатын жүйеге қатысты

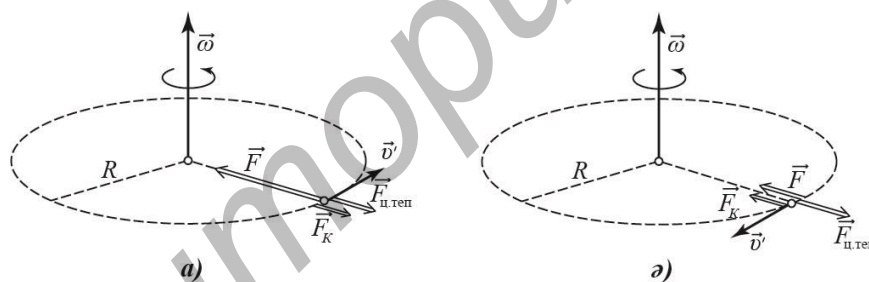
$a'_n = \frac{v'^2}{R}$ үдеуімен қозғалады, ал бұл үдеуді ол қандайда болма-

сын бір күштің әсерінен алған секілді болады, олай болса, айналатын жүйеде тұрған бақылаушы үшін, центрге тартқыш күші \vec{F}' мынаған тең:

$$F' = ma'_n = \frac{m\nu'^2}{R} = F - 2m\nu'\omega - m\omega^2 R. \quad (8.14)$$



8.8



8.9

Сонымен, дискіде «орналасқан» бақылаушы үшін материялық нүктеге әсер ететін «нақты», \vec{F} күшінен басқа айналу өсінен әрі бағытталған, қосымша екі күш әсер етеді деген қорытындыға келеміз. Оның бірі – $m\omega^2 \vec{R}$ бізге таныс центрден тепкіш $\vec{F}_{ц.теп}$ күші. Екіншісі – $2m\nu'\omega$ -ға тең қосымша күш радиус бойымен әсер етеді және ол \vec{v}' жылдамдығымен айналушы жүйе ішінде дененің қозғалуынан туып отыр. Бұл күшті **Кориолис күші** деп атайды. Сонымен Кориолис күшінің модулі $F_K = 2m\nu'\omega$. Бұл жағдайда Кориолис күші нормаль күштермен

бағыттас, демек, \vec{F}_K векторы және \vec{v}' векторына перпендикуляр. Сондықтан да векторлық түрде былай жазамыз:

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}' \vec{\omega}]. \quad (8.15)$$

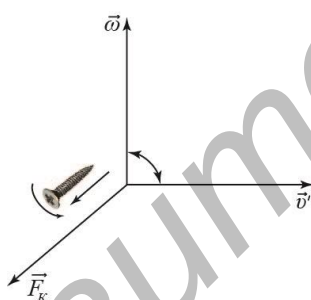
Кориолис күші $\vec{v}' = 0$ болған жағдайда пайда болмайды. $\vec{F}_{ц.теп}$ күші \vec{v}' -тан тәуелді емес, біз атап өткендей, ол дене қозғалса да, қозғалмаса да әсер ете береді.

Енді 8.9,ә-суретінде бейнеленген жағдайға көшейік, сонда бұл жағдайда \vec{v} жылдамдығының модулі $v' - \omega R$, егер $v' > \omega R$ -ден болса, ал егер $\omega R > v'$ -тан болса, онда $\omega R - v'$; екі өрнектің де квадраттары бірдей:

$$F = \frac{mv^2}{R} = \frac{m(v' - \omega R)^2}{R} = \frac{mv'^2}{R} - 2m v' \omega + m \omega^2 R.$$

Осыған сәйкес [қараңыз:(8.14) тендеуіне ұқсас]

$$\frac{mv'^2}{R} = F + 2m v' \omega - m \omega^2 R.$$



8.10

Демек, айналатын жүйедегі материялық нүкте оған шеңбердің центріне бағытталған \vec{F} және \vec{F}_K екі күштер және центрден әрі бағытталған, $\vec{F}_{ц.теп} = m\omega^2 R$ центрден тепкіш күші әсер етіп тұрғандай сезінеді [қараңыз: 8.9,ә-сурет]. \vec{F}_K күші бұл жағдайда да (8.15) өрнегімен өрнектеледі.

Барлық жағдайда Кориолис күшінің бағыты әрі \vec{v}' жылдамдығына, әрі айналыс өсіне перпендикуляр болады. \vec{F} күшінің бағытын анықтау үшін бұрыштық $\vec{\omega}$ жылдамдық векторын пайдаланамыз. Сонда \vec{F}_K Кориолис күшінің бағыты $\vec{\omega}$ және \vec{v}' векторлары жатқан жазықтыққа перпендикуляр болады (8.10-сурет). Егер бұrandаның басын сағат тілі жүрісінің бағытына қарсы, \vec{v}' векторынан $\vec{\omega}$ векторына қарай айналдырса, онда бұrandаның ілгерілемелі қозғалысы \vec{F}_K күшінің бағытымен дәл келеді.

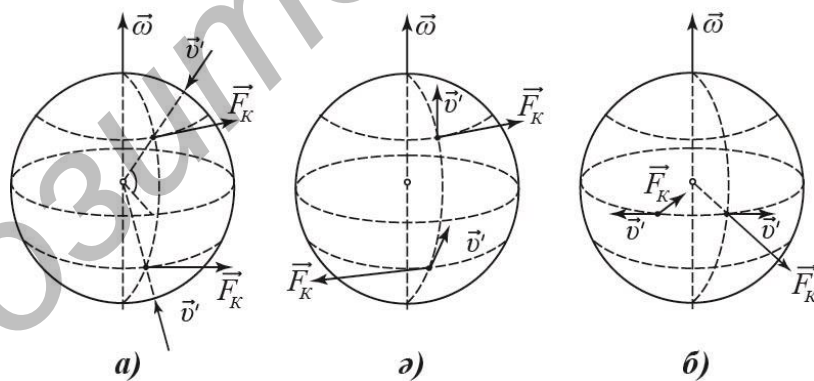
(8.15) өрнекті біз K' айналу жүйесі өсінде центрі орналасқан шеңберге жанама бойынша бағытталған, нүктенің жылдамдығы үшін алдық. Айналу өсіне қатысты, \vec{v}' жылдамдығының кезкелген бағытындағы Кориолис күшін, осы өрнекпен анықтауға болатындығын көрсетуге болады. Өрнектен мынаны көруге болады: егер нүкте инерциялық емес жүйесінде айналу өсіне параллель (\vec{v}' векторы $\vec{\omega}$ векторымен коллинеар) қозғалса, онда Кориолис күші пайда болмайды.

Векторлық көбейтінді екі көбейткішке де перпендикуляр. Сондықтан (8.15) өрнегінен мынадай қорытындылар шығады:

1) Кориолис күші $\vec{\omega}$ векторына перпендикуляр, яғни ол әрқашанда айналатын санақ жүйесі өсіне перпендикуляр, жазықтықта жатады.

2) Кориолис күші \vec{v}' жылдамдығына перпендикуляр, демек, нүктемен жұмыс жасамайды. Бұл күш \vec{v}' жылдамдығының бағытын өзгертеді, бірақ оның модулін өзгертпейді.

Сонымен қорыта келгенде, Кориолис күші пайда болу үшін, бөлшектің m массасы, \vec{v}' жылдамдығы және жүйенің $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдығы бар болуы қажетті шарт болып табылады. Сонда оны (8.15) тендеуімен өрнектеу орын алады.



8.11

Жер бетіне жақын орналасқан денелерге Кориолис күшінің көрсететін әсерін 8.11-суретінен көруге болады. Дененің еркін түсуі кезінде (8.11,а-сурет) Кориолис күші оны шығысқа қарай ауытқытады. Бұл ауытқу Жердің ендігінің синусына пропор-

ционал, демек, экваторда максималь, ал полюстерде нөлге тең болады. Дене экваторда 30 м биіктіктен құлағанда, ауытқу шамасы 3,6 мм-ге жетеді. Алыс қашықтыққа атқылауда (соғыс құралында) Кориолис күшін міндетті түрде ескеру керек және соған байланысты түзетулер жасалады.

Солтүстік жартышардан солтүстікке бағыттап зеңбіректен атқан кезде, снаряд шығысқа қарай ауытқиды (8.11,*a*-сурет), ал оңтүстік жарты шарда-батысқа қарай ауытқиды (8.11,*ә*-сурет). Экватор сызығы бойымен айналған жағдайда, егер атыстың бағыты шығысқа қарай болса, онда Кориолис күші снарядты көтереді, ал егер атыс батысқа қарай бағытталса, ол күш снарядты Жерге қарай ауытқытып басады (8.11,*б*-сурет).

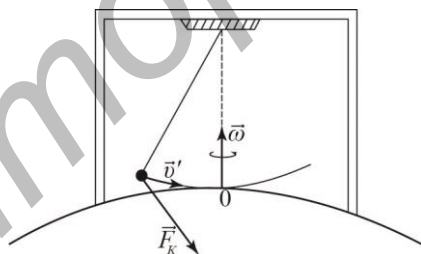
8.11,*ә*-суретінде кез-келген бағытта (солтүстікке немесе оңтүстікке) меридиан бойымен қозғалатын денеге әсер ететін Кориолис күші бағытына қатысты солтүстік жартышарда оңға, ал оңтүстік жартышарда солға бағытталады. Бұл солтүстік жартышарда өзеннің оң жақ жағасының, ал оңтүстік жартышарда өзеннің сол жақ жағасының шайылуын тудырады. Сол сияқты екі рельсті жолда Кориолис күшінің әсерінен солтүстік жартышарда оң рельс күшті қажалып тозатын болса, оңтүстік жартышарда – сол жағы күшті қажалып, тозады.

8.6. Фуко маятнигі

1. Шын мәнінде еркін түсетін денелердің шығысқа қарай еңкеюіне (ауытқуы) қарап, Жер санақ жүйесінің, тәжірибе жүзінде, инерциялық еместігінің дәлелі десе де болар еді. Алайда, мұндай тәжірибелердің қойылуы қиындыққа түседі, ал шындап келгенде дәлдігіде өте төмен. Осындай мақсатқа ең қолайлысы **Фуко маятнигі**. Оның ұзындығы 98 м жіпке ілінген, массивті шар, тепе-теңдік қалпы айналасында, кішкене тербелістер жасайтын маятник. Ол Санкт-Петербург қаласында, Исаакиев шіркеуінде орналасқан. Маятникті тепе-теңдік қалпынан ауытқытып, оның өзіне тербеліс жасауға мүмкіндік береміз. Егер Жер инерциялық жүйе болса, онда маятникке «нағыз күштер» әсер еткен болар еді, яғни ол күштеріміз $m\vec{g}$ дененің салмағы және \vec{F} жіптің керілу күші (үйкеліс күшін және ауа кедергісін есепке

алмаймыз). Бұл екі күштер вертикаль жазықтықта жатыр. Сондықтан егер маятникке бүйірлік бағыттан түрткі болмаса, онда Жерге қатысты қозғалмайтын вертикаль жазықтықта тербеліс берер еді. Тәжірибе мұның бұлай еместігін көрсетті. Жер санақ жүйесінде, қарастырылып отырған маятник тербелісінің вертикаль жазықтығының жайлап бұрылатындығын; оның бұрылу бағыты аспан күмбезінегі Күн мен жұлдыздардың тәуліктік айналысы бағытына сәйкес келетіндігін көрсетті. Бұдан Жер санақ жүйесінің инерциялық емес екендігінің дәлелі болды.

Маятниктің тербеліс жазықтығының айналуын түсіндіру үшін, Жер $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдықпен, бізге белгісіз инерциялық санақ жүйесіне қатысты, бірқалыпты айналады деп болжам жасаймыз. Сонда Жер санақ жүйесінде маятникке әсер ететін, «нағыз күштерден» басқа, центрден тепкіш және Кориолис күштері келіп қосылады. Маятниктің қозғалысы (8.14) теңдеуімен сипатталады. Кориолис күші $2m[\vec{v}'\vec{\omega}]$ маятниктің тербеліс жазықтығына перпендикуляр. Демек, ол осы жазықтықтың айналуына себепші болады.



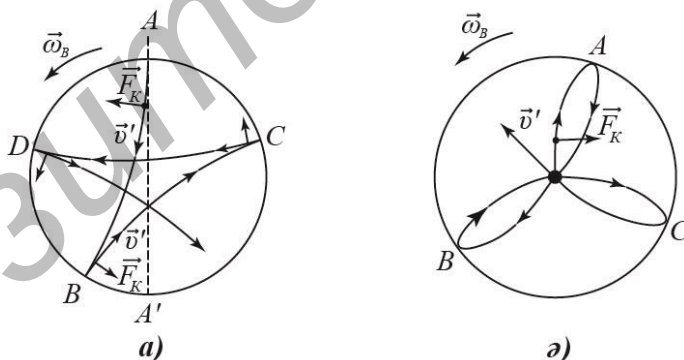
8.12

2. Айталық, тәжірибе Жердің полюсінде жасалған болсын дейік. Онда $\vec{\omega}$ векторы вертикаль бойымен бағытталады (8.12-сурет). Маятник тербелген кезде оның \vec{v}' жылдамдығы $\vec{\omega}$ -ға перпендикуляр, демек, оған Кориолис күші әсер етеді, ол күштің шамасы

$$F_K = 2m\vec{v}'\omega.$$

Бұл күшті \vec{v}' векторының бойымен қарасақ, ол оңға бағытталған және горизонталь жазықтықта жатады. Соның нәтижесінде маятниктің тербеліс жазықтығы өзгеріссіз қалмайды. Ол Жердің

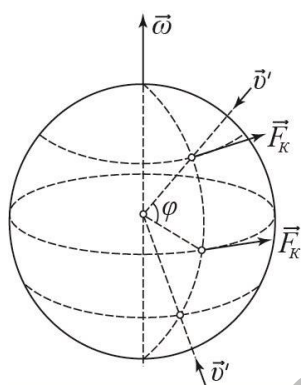
бұрыштық айналу жылдамдығындай жылдамдықпен қарама-қарсы жаққа айналады, яғни тәулігіне бір толық айналыс жасайды. Жердің $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдығының $\vec{\omega}_r$ горизонталь және $\vec{\omega}_B$ вертикаль құраушыларының $\vec{\omega}_r$ құраушысын ескермей, Жер тек $\vec{\omega}_B$ бұрыштық жылдамдығымен айналады деп есептейік. Айталық, $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдығы сурет жазықтығына және оқушыға перпендикуляр бағытталсын (8.13-сурет). Кориолис күші $2m[\vec{v}' \vec{\omega}_B]$ маятниктің тербелісінің **қозғалу бағытымен** (\vec{v}' жылдамдығы бағытымен) қарағанда, оның траекториясына перпендикуляр болып, оңға бағытталады (8.13,*a*-сурет). Осы күш траекторияны қисайтады. Егер Кориолис күші болмаса, маятник диаметралды қарсы A' нүктесіне келген болар еді. Мұнда біз маятникті A нүктесіне ауытқытып, сонан соң оған жылдамдық бермей жіберіп қалдық. Кориолис күші маятникті сыртқа қарай бұрғандықтан, ол B нүктесіне келді. Бұл нүктеде маятниктің жылдамдығы нөлге айналып, сол бағытын өзгертеді. Осылайша бұл процесс қайталанып, маятник жаңа $C, D...$ нүктелеріне келеді. Нәтижесінде 8.13,*a*-суретінде көрсетілгендей бұрыштық нүктелері бар күрделі схемалық бейне алынды.



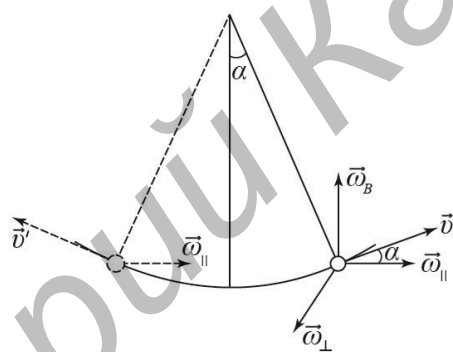
8.13

Маятник тепе-теңдік қалыпта тұрғанда оны түртіп жіберсе, ол жағдайда, оның траекториясының сипаты басқаша болады. Траектория бұрынғысынша оңға қарай иілуін жалғастыра береді. Бірақ шеткі $A, B, C...$ нүктелерін (8,13,*б*-сурет) ол центрден қозғалғанда, Кориолис күшінің әсерінен алған нөлден айрықша

азимуталдық жылдамдықтарымен өтеді. Соның нәтижесінде, бұрылғандағы үшкірінде нүкте емес, суреттегідей жалпақ дөңгелену байқалады. Жердің баяу айналуына байланысты бақылаушы маятниктің тербелу жазықтығының қисаюын байқамайды. Екі жағдайда да маятниктің тербеліс жазықтығы вертикальдің айналасында $\omega_g = \omega \sin \varphi$ бұрыштық жылдамдығымен айналады.



8.14



8.15

Айталық, тәжірибе φ географиялық ендікте Жер бетінде жүзеге асырылған болсын (8,14-сурет). Бұрыштық жылдамдық $\vec{\omega}$ - ны $\vec{\omega}_r$ горизонтал және $\vec{\omega}_B$ вертикаль құраушыларына жіктейміз. Сонда $\vec{\omega} = \vec{\omega}_B + \vec{\omega}_r$ векторлық қосынды түрінде жазылады. Ал горизонталь құраушыны $\vec{\omega}_{\parallel}$ және $\vec{\omega}_{\perp}$ құраушыларына жіктейміз (8.15-сурет). Оның $\vec{\omega}_{\parallel}$ құраушысы маятниктің тербеліс жазықтығында жатса, $\vec{\omega}_{\perp}$ оған перпендикуляр болады. Бұл жағдайда (8.14) теңдеуін мына түрде жазамыз:

$$m\vec{a}' = \vec{F} - 2m[\vec{v}'\vec{\omega}_B] - 2m[\vec{v}'\vec{\omega}_{\perp}] - 2m[\vec{v}'\vec{\omega}_{\parallel}] - m\omega^2\vec{R}.$$

Кориолис күшінің $2m[\vec{v}'\vec{\omega}_{\perp}]$ құраушысы маятник жібінің бойымен бағытталған. Ол жіптің керілуін және маятниктің тербеліс периодын сәл ғана өзгертеді. Маятниктің тербеліс жазықтығының күйінің өзгертуіне бұл құраушының ықпалы жоқ деуге де болады. Сондықтан бұл құраушыны теңдеудің мүшелерінен шығарып тастауымызға болады. Екінші Кориолис күшінің құ-

раушысы $2m[\vec{v}'\vec{\omega}_B]$ -нің біздің есебімізде елеулі рөлі бар. Үшінші құраушы $2m[\vec{v}'\vec{\omega}_H]$ маятниктің тербеліс жазықтығына перпендикуляр, сондықтан бұл жазықтыққа оның да ықпалы болады. Алайда, маятниктің кішкене тербеліс кезінде, α бұрышының кіші болуына байланысты, бұл құраушы да аз шама болады. Онымен қоса, маятниктің тербелісі кезінде, ол периодты түде бағытын өзгертіп отырады. Маятник 0 центрінен оңға не солға қозғалғанда, $2m[\vec{v}'\vec{\omega}_H]$ құраушысы сурет жазықтығынан әрі қарай бағытталады (8.15-сурет). Маятник шеткі жағдайдан 0 центрінен жақындаған кезде, ол қарама-қарсы жаққа, яғни оқушыға қарай бағытталады. Сондықтан бұл күшті де алып тастаймыз.

Нәтижесінде салыстырмалы қозғалыстың теңдеуі (8.14) теңдеуінің түріне келеді. Демек, теңдеуіміз полюстегі тұрған жағдайымыздағыдай болады. Мұның одан сәл айырмашылығы $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдығы орнына, $\vec{\omega}_B$ бұрыштық жылдамдығының болуында, яғни

$$m\vec{a}' = \vec{F} - 2m[\vec{v}'\vec{\omega}_B] - m\omega^2\vec{R}. \quad (8.16)$$

Сонымен φ географиялық ендікте маятниктің тербеліс жазықтығының мәні полюстегіден аз болады және оны былай анықтайды.

$$\vec{\omega}_B = \vec{\omega} \sin \varphi, \quad (8.17)$$

мұндағы $\vec{\omega}$ – полюстегі нүктенің (немесе Жердің) бұрыштық айналу жылдамдығы, $\vec{\omega}_B$ – φ ендігіндегі бұрыштық жылдамдық.

8.7. Ауырлық күшінің географиялық ендікке тәуелділігі

Инерциялық емес айналушы жүйелерде пайда болатын инерциялық күштерді әртүрлі механикалық есептерді шешуде қолдану маңызды рөл атқарады. Осының алдындағы тақырыптарда Жер шарының $\vec{\omega}$ – бұрыштық жылдамдықпен айналатынын қарастырдық. Жердің өз өсінің айналасындағы тәуелсіз бұрыштық жылдамдығы

$$\omega = 2\pi \frac{\text{рад}}{\text{тәул}} = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$$

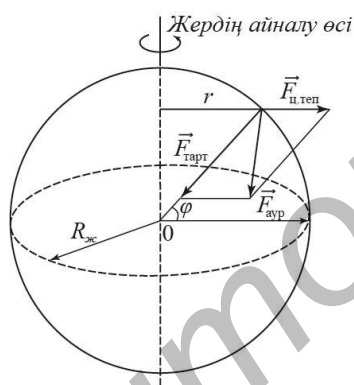
шамасына тең. Олай болса осы Жердің $\vec{\omega}$ бұрыштық жылдамдығының дененің еркін түсу үдеуіне және салмағына қандай ықпалының барлығына тоқталайық. Ол үшін географиялық φ ендікте орналасқан массасы m болатын денені қарастырамыз. Денеге Жер бетінде екі күш әсер етеді. Оның бірі Жердің тарту күші

$$F_{\text{тарт}} = G \frac{M_{\text{ж}} m}{R_{\text{ж}}^2} = mg_0$$

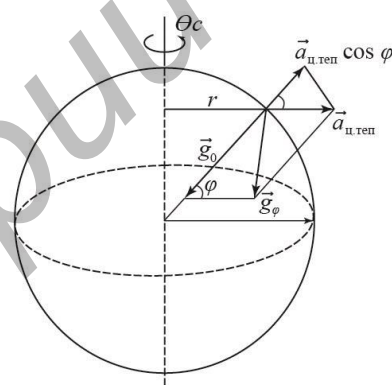
және екіншісі центрден тепкіш күш

$$F_{\text{ц.теп}} = m \cdot a_{\text{ц.теп}} = m\omega^2 r,$$

мұндағы r – дененің айналу өсінен қашықтығы.



8.16



8.17

Географиялық φ ендіктегі бұл екі күштің қорытқы күші – ауырлық күші (8.16-сурет) былай анықталады:

$$\vec{F}_{\text{аур}} = \vec{F}_{\text{тарт}} + \vec{F}_{\text{ц.теп}}. \quad (8.19)$$

Егер дене еркін болса, онда ол g_φ үдеуін алады, сондықтан

$$\vec{F}_{\text{аур}} = m\vec{g}_\varphi.$$

Олай болса (8.19) теңдеуін мына түрде жазамыз:

$$m\vec{g}_\varphi = m\vec{g}_0 + m\vec{a}_{\text{ц.теп}}.$$

Демек, қарастырып отырған денеміздің φ ендігіндегі үдеуі мынаған тең:

$$\vec{g}_\varphi = \vec{g}_0 + \vec{a}_{\text{ц.теп}}. \quad (8.20)$$

Экваторда g_φ және g_0 үдеулерінің ең үлкен айырмашылығы мынадай болады:

$$g_\varphi - g_0 = R_{\text{ж}} \omega^2 = 0,034 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}.$$

Бұл ендікте бақыланатын ($9,81 \text{ м/с}^2$) үдеудің шамамен орташа алғанда $1/300$ бөлігін құрайды. 8.17-суретінде \vec{g}_φ мен \vec{g}_0 -дің бағыттарының арасындағы бұрыш барынша күшті үйкейтілген, егер осы ауытқуды ескермесек, онда g_φ шамасын есептеуге болады. Радиустың созындысына $\vec{a}_{\text{ц.теп}}$ векторын проекциялап және бұл проекцияны g_0 -ден алып тастасак, алатынымыз:

$$g_\varphi = g_0 - \vec{a}_{\text{ц.теп}} \cos \varphi,$$

мұндағы $\vec{a}_{\text{ц.теп}} = \omega^2 r = \omega^2 R_{\text{ж}} \cos \varphi = 0,034 \cos \varphi$ болғандықтан

$$g_\varphi = g_0 - 0,034 \cos^2 \varphi. \quad (8.21)$$

Дененің Жер бетіндегі салмағы. Дененің салмағын тартылыс күші және центрден тепкіш күші арқылы өрнектейік. Тыныштықта тұрған денеге

$$\vec{F}_{\text{тын}} = \vec{F}_{\text{тарт}} + \vec{F}_{\text{ц.теп}}$$

күш әсер етеді. Дәл осындай күшпен тыныштықта тұрған дене тірекке күш түсіреді. Сондықтан Жер бетінде дененің \vec{P} салмағын былай анықтаймыз:

$$\vec{P} = \vec{F}_{\text{тарт}} + \vec{F}_{\text{ц.теп}}. \quad (8.22)$$

Дененің салмағы $F_{\text{тарт}}$ тартылыс күшімен модулі жағынан да, бағыты жағынан да айырмашылығы бар (әрине ол айырмашылық айтарлықтай емес). $\vec{F}_{\text{ц.теп}}$ күші географиялық ендікке тәуелді болатындықтан дененің салмағы да ендіктен тәуелді болады. Дененің салмағын масса мен еркін түсу үдеуінің көбейтіндісі түрінде жазуға болады:

$$\vec{P} = m \vec{g}_\varphi.$$

Бұл өрнек дене мен тірек Жерге қатысты қозғалыссыз болған жағдайда дұрыс болады. Егер дене мен тірек белгілі бір \vec{a} үдеу-

мен қозғалатын болса, онда салмақ $m\vec{g}_\varphi$ -ге тең болмайды. Шынында да, \vec{a} үдеуімен қозғалатын санақ жүйесінде, тартылыс күштен басқа, Жердің айналуына байланысты инерция күштері ($\vec{F}_{ц.теп}$ және $\vec{F}_{кор}$) және K' санақ жүйесінің ілгерілемелі қозғалысына байланысты $\vec{F}_{ин.ілгер}$ инерция күші әсер етеді:

$\vec{F}_{ин.ілгер} = -m\vec{a}$. Бұл күштердің қорытқы күші мынаған тең:

$$\vec{F}_{корт} = \vec{F}_{тарт} + \vec{F}_{ц.теп} + \vec{F}_{кор} + \vec{F}_{ин.ілгер}.$$

Осындай күшпен K' санақ жүйесіндегі орналасқан тыныштықта тұрған дене, өзін ұстап тұрған тірекке әсер етеді. Сонда

$$\vec{P} = \vec{F}_{корт}.$$

Егер мынаны ескерсек,

$$\vec{F}_{тарт} + \vec{F}_{ц.теп} = m\vec{g}_\varphi,$$

онда алатынымыз:

$$\vec{P} = m\vec{g}_\varphi + \vec{F}_{кор} - m\vec{a}. \quad (8.23)$$

Егер Кориолис күші онша үлкен емес болса, (дененің Жерге қатысты жылдамдығы аз болатын кезде), онда оны ескерусіз қалдыруға болады. Ендеше

$$\vec{P} = m\vec{g}_\varphi - m\vec{a} = m(\vec{g}_\varphi - \vec{a}) = m\vec{g}^*, \quad (8.24)$$

мұндағы \vec{g}^* – K' - санақ жүйесіндегі инерция және тартылыс күші өрісіндегі қорытқы кернеуік. (8.23) өрнегі дененің салмағын жалпы жағдайда, ал (8.24) өрнегі Кориолис күшін ескермеген жағдайда анықтайды. (8.24) өрнегі кез-келген трек пен ілгек үшін дұрыс болады.

Бакылау сұрақтары

1. Қандай санақ жүйесін инерциялық емес деп атайды? Неліктен инерциялық емес санақ жүйесінде Ньютонның заңдары орындалмайды? Инерциялық емес санақ жүйесінің қандай түрлерін білесіз?
2. Инерциялық емес санақ жүйесіндегі дене үшін қозғалыс теңдеуін (Ньютонның екінші заңын) жазыңыз.
3. Инерция күшінің қасиетіне тоқталыңыз. Инерциялық емес санақ жүйесінде сақталау заңы орындала ма?
4. Инерция күшінің өрісі туралы баяндаңыз.

5. Инерциялық центрден тепкіш күші дегеніміз не? Оның бағытын қалай білуге болады?

6. Қандай инерция күштерін кориолистік деп атайды? Кориолистік күштердің әсерін көрсететін мысалдарды келтіріңіз. Кориолис күшінің пайда болу себебін түсіндіріңіз. Егер дене жүйесінің айналу өсіне параллель қозғалса, онда кориолистік күш неге пайда болмайды?

7. Дененің еркін түсуі кезінде оған кориолистік күш қалай әсер етеді? Соғыс құралдарынан атқылау кезінде Кориолис күшін ескерудің, соған байланысты түзетулер жасаудың мысалын келтіріңіз.

8. Фуко маятнігі туралы не білесіз? Ол не үшін қолданады?

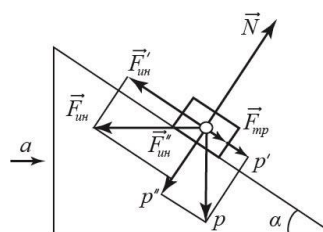
9. Ауырлық күшінің географиялық ендікке тәуелділігі жөнінде баяндаңыз.

Есептерді шығару мысалдары

8.1-есеп. Көлбеулік бұрышты α болатын көлбеу жазықтықта жатқан денені, көлбеу жазықтықпен көтеру үшін, көлбеу жазықтық қандай аз үдеумен горизонталь бағытта қозғалуы керек? Көлбеу жазықтықпен дененің арасындағы үйкеліс коэффициенті k .

Берілгені: Көлбеулік бұрышы α болатын көлбеу жазықтық;
 k – үйкеліс коэффициенті.
 a – ?

Шешуі: Көлбеу жазықтықпен байланысқан сынық жүйесінде 8.18-суретіне қарағанда, 4 күш әсер етіп тұр: ауырлық күші $\vec{P} = m\vec{g}$, инерция күші $\vec{F}_{ин} = m\vec{a}$, көлбеу жазықтықтың тірегінің реакция күші \vec{N} және үйкеліс күші $\vec{F}_{үйк} (\vec{F}'_{ин} + \vec{P}'')$, мұндағы m – дененің массасы, a – көлбеу жазықтықтың үдеуі. Үдеуінің ең аз шамасын бұл күштердің көлбеу жазықтық бойындағы проекцияларының қосындысы нөлге тең болу шартын табамыз, яғни $\vec{F}'_{ин} = \vec{F}_{үйк} + \vec{P}''$. Мұндағы $\vec{F}'_{ин} = m\vec{a} \cos \alpha$, $\vec{P}'' = m\vec{g} \sin \alpha$ екенін ескерсек, алатынымыз:

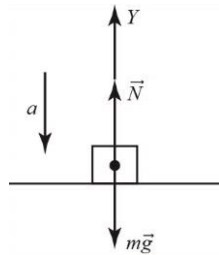


8.18

$$a = \frac{(\sin \alpha + k \cos \alpha)g}{\cos \alpha - k \sin \alpha}$$

8.2-есеп. Массасы 70 кг болатын адам баяу 1 м/с^2 үдеумен лифтмен қозғалып, жоғары көтеріледі. Адамның лифтінің еденіне түсіретін қысым күшін анықтаңыз.

Берілгені: $m=70$ кг; $a=1$ м/с².
 $F=?$



8.19

Шешуі: Лифтідегі адамға әсер ететін күштер: $m\vec{g}$ – ауырлық күші және \vec{N} – лифт кабинасының еденінің реакция күші (8.19-сурет). Қозғалыс үдеуі вертикаль төмен бағытталған. Ньютонның екінші заңын адам үшін жазатын болсақ, онда

$$\vec{N} - m\vec{g} = m\vec{a}. \quad (8.25)$$

Y өсін қозғалыс бағытымен бағыттап, Y өсіне күштің және үдеудің проекциясын табамыз, сонда

$$N - mg = -ma, \quad (8.26)$$

осыдан

$$N = mg - ma = m(g - a); \quad N = 70(9,8 - 1) \text{ Н} = 616 \text{ Н}.$$

Ньютонның үшінші заңына сүйенсек адамның лифтің кабинасының еденіне қысым күші F , ол модулі бойынша кабина еденінің N реакция күшіне тең:

$$F = N = 616 \text{ Н}.$$

Тапсырмалар

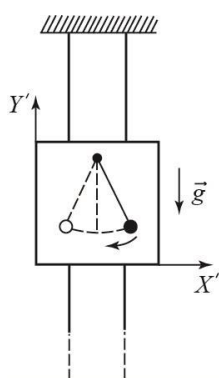
1. Космос (ғарыш) кемесінде, тежелу қозғалтқышы қосылып қозғалған жағдайда, салмақсыздық күй болады. Кеме Жер атмосферасына енген жағдайда, оның жоғалып кетуі неліктен? Жерге қонуға бағытталған ғарыш кемесінің уақытқа байланысты жылдамдығы мен үдеуінің өзгерісінің графигін және инерция күшінің және кемеінің ішіндегі инерция күшінің өзгеріс графигін сызыңыз. Траекторияның қандай бөлігінде артық салмақ пайда болады?

2. Жоғарыдан төмен вертикаль бағытта салмақсыздық күйдің пайда болуын бақылау үшін, үйдің төбесінен еденіне дейін тартылған жіңішке сымдар бойымен еркін қозғалатындай етіп, фанерадан жасалған төртбұрышты тақтайша «щит» орнатылады (8.20-сурет). Щитке ұзындығы l болатын маятник іледі. Щит қозғалмай тұрғанда, маятник тіктеуіш сызығының айналасында тербеледі. Маятник ең үлкен ауытқу жасаған мезетте щитті жіберіп қалады, сонда ол еркін төмен түседі (құлайды). Осы уақыт мезетінен бастап, «щит» санақ жүйесінде, салмақсыздық басталады. Бұл кезде маятникке әсер ететін ауырлық күші жоғалып кетеді және маятник жібінің керілу серпінді күші де жоғалады. Щиттің төмен құлауы кезінде маятник тербелісін тоқтатады. Бұл еркін түсу (құлау) кезінде жүйеде салмақсыздықтың басталғанын көрсетеді. Егер сіз маятник тербелісінің төменгі күйінде болған мезетте, щитті төмен түсіріп жіберсеңіз, қандай жағдай байқалар еді?

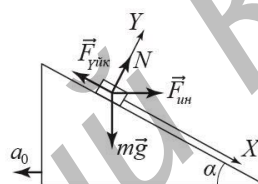
3. Массасы m болатын дене үйкеліс күшінің әсерінен көлбеу жазықтықтың биіктігінде тұр (8.21-сурет). Егер көлбеу жазықтық суретте көрсетілген

бағытта $a_0 = 1,00 \text{ м/с}^2$ үдеуімен горизонталь бағытта қозғалса, онда дене қанша уақытта көлбеу жазықтықтан сырғып түсер еді? Жазықтықтың ұзындығы $l = 1,00 \text{ м}$, горизонтқа көлбеулік бұрышы $\alpha = 30^\circ$, жазықтық пен дененің арасындағы үйкеліс коэффициенті $k = 0,60$.

Жауабы: $t = \sqrt{2l [g(\sin \alpha - k \cos \alpha) + a_0(\cos \alpha + k \sin \alpha)]^{-1}} \text{ с} = 0,8 \text{ с}$.



8.20



8.21

4. Географиялық ендігі $\varphi = 60^\circ$ болатын жағдайда дене $h = 200 \text{ м}$ биіктіктен еркін құлайды. Жердің айналуына байланысты туатын инерцияның кориолистік күшінің әсерінен дененің қаншалықты ауытқитынын анықтаңыз.

Жауабы: $s = \frac{2}{3} \omega_0 h \sqrt{\frac{2h}{g}} \cos \varphi = 3 \text{ см}$.

Мазмұны

Алғы сөз	3
Кіріспе	4

БІРІНШІ ТАРАУ

КИНЕМАТИКА

1.1. Материялық нүктенің кинематикасы.....	19
1.2. Материялық нүктенің қозғалыс жылдамдығы	30
1.3. Үдеу – векторлық шама.....	35
1.4. Қисық сызықты қозғалыс. Тангенциалдық және нормаль үдеу	40
1.5. Қозғалыстың тәуелсіздік принципі. Координаталар және жылдамдықтар үшін Галилей түрлендірулері.....	43
1.6. Материялық нүктенің шеңбер бойымен қозғалысы	47
1.7. Сызықтық және бұрыштық кинематикалық шамалар арасындағы қатыстар.....	51
1.8. Тербелмелі қозғалыс	52
1.9. Гармониялық тербелісті сипаттайтын физикалық шамалар.....	54
1.10. Гармониялық тербелмелі қозғалыстың жылдамдығы мен үдеуі.....	57
1.11. Гармониялық тербелістің радиус-вектордың айналысымен байланысы	59
1.12. Бір бағыттағы тербелістерді қосу. Векторлық диаграмма	60
1.13. Бір бағыттағы жиіліктері ω_1 және ω_2 әртүрлі екі тербелісті қосу ..	63
1.14. Екі өзара перпендикуляр тербелістерді қосу	66
1.15. Спектрлер және гармониялық спектрлік анализ.....	71

ЕКІНШІ ТАРАУ

ДИНАМИКА

2.1. Ньютонның бірінші заңы	82
2.2. Күш және масса	87
2.3. Ньютонның екінші заңы	92
2.4. Ньютонның үшінші заңы	94
2.5. Галилей түрлендірулерінен туындайтын салдарлар.....	96
2.6. Ньютонның екінші заңының жалпы түрде жазылуы	99
2.7. Материялық нүктенің импульсінің сақталу заңы	100
2.8. Материялық нүктенің күш моменті, импульс моменті және инерция моменті	102
2.9. Центрлік күш әсер еткендегі материялық нүктенің импульс моментінің сақталуы	110

2.10.	Күштің жұмысы және қуаты.....	111
2.11.	Консервативтік және консервативтік емес күштердің жұмысы.....	115
2.12.	Кинетикалық энергия	119
2.13.	Потенциалдық энергия.....	121
2.14.	Потенциалдық күш өрісіндегі материялық нүктенің толық энергиясының сақталуы	128

ҮШІНШІ ТАРАУ

МАТЕРИАЛЫҚ НҮКТЕЛЕР ЖҮЙЕСІНІҢ ДИНАМИКАСЫ

3.1.	Материялық нүктелер жүйесі	135
3.2.	Жүйелердің сыртқы және ішкі күштері.....	136
3.3.	Импульстің сақталу заңы	138
3.4.	Жүйенің масса центрі.....	139
3.5.	Реактивтік қозғалыс.....	143
3.6.	Массасы айнымалы нүктелердің қозғалыс теңдеуі	145
3.7.	Консервативтік жүйедегі механикалық энергияның сақталу заңы	151
3.8.	Серпімді және серпімсіз соқтығысу (өзара әсерлер).....	156
3.9.	Дененің бөлшектенуі кезіндегі тебілу энергиясы	164
3.10.	Жүйенің импульс моменті, тұрақты жүйедегі импульс моментінің сақталуы	167

ТӨРТІНШІ ТАРАУ

ҚАТТЫ ДЕНЕНІҢ МЕХАНИКАСЫ

4.1.	Абсолют қатты дене ұғымы.....	176
4.2.	Қатты дененің ілгерлемелі қозғалысы	176
4.3.	Қатты дененің айналмалы қозғалысы	178
4.4.	Қатты денелердің қозғалыстарын қосу.....	179
4.5.	Айналу өсімен салыстырғандағы қатты дененің күш моменті.....	183
4.6.	Қатты дененің инерция моменті және импульс моменті	187
4.7.	Кейбір денелердің инерция моменттерін есептеу тәсілдері	191
4.8.	Штейнер теоремасы.....	194
4.9.	Айналатын қатты дененің кинетикалық энергиясы	195
4.10.	Жазық қозғалыс кезіндегі дененің толық кинетикалық энергиясы	198
4.11.	Қатты дененің импульс моментінің сақталу заңы	200
4.12.	Денелер жүйесінің импульс моментінің сақталу заңы	202
4.13.	Дененің еркін айналу өстері	206
4.14.	Қатты дененің қозғалыс теңдеуі. Қатты дененің статикасы	212
4.15.	Гироскоп, оның өсінің мәжбүрлік прецессиясы. Гироскоптық эффект.....	214

4.16. Гироскоптардың түрлері	223
------------------------------------	-----

БЕСІНШІ ТАРАУ

СЕРПІМДІ КҮШТЕР

5.1. Серпімді және серпімсіз деформациялар	229
5.2. Серпімділік күші және біржақты созылу (сығылу) деформациясы кезіндегі Гук заңы	235
5.3. Серпімділік күші және ығысу деформациясы кезіндегі Гук заңы	238
5.4. Серпімділік күштері және жан-жақты сығу кезіндегі Гук заңы	241
5.5. Серпімділік күштері және бұралу кезіндегі Гук заңы	242
5.6. Серпімді деформацияланған дененің потенциалдық энергиясы. Энергия тығыздығы	244

АЛТЫНШЫ ТАРАУ

ҮЙКЕЛІС КҮШТЕРІ ЖӘНЕ ОҒАН ҚАТЫСТЫ ҚОЗҒАЛЫСТАР

6.1. Үйкеліс күштері	251
6.2. Құрғақ үйкеліс және оның заңдары	253
6.3. Сұйық үйкеліс	262

ЖЕТІНШІ ТАРАУ

ТАРТЫЛЫС КҮШТЕРІ

7.1. Бүкіл әлемдік тартылыс заңы	267
7.2. Тартылыс тұрақтысы және оны анықтау әдістері	273
7.3. Ауырлық күші және салмақ	278
7.4. Дененің гравитациялық және инерттік массалары	281
7.5. Инерциялық күш. Инерциялық күштер мен гравитациялық күштердің эквиваленттілігі	283
7.6. Гравитациялық өріс. Гравитациялық өрістің кернеулігі мен потенциалы	287
7.7. Электрлік және гравитациялық өрістегі қозғалыстар үшін энергиямен импульстің заңдарын пайдалану	289
7.8. Космостық (ғарыштық) жылдамдықтар	292
7.9. Кеплер заңдары	295

СЕГІЗІНШІ ТАРАУ

ИНЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС САНАҚ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ҚОЗҒАЛЫС

8.1. Инерциялық емес санақ жүйелері және олардың түрлері	307
--	-----

8.2.	Түзу сызықты қозғалатын инерциялық емес санақ жүйесі	308
8.3.	Инерция күшінің қасиеті.....	310
8.4.	Центрден тепкіш инерция күші	313
8.5.	Кориолис күші	316
8.6.	Фуко маятнігі	321
8.7.	Ауырлық күшінің географиялық ендікке тәуелділігі	325

ТОҒЫЗЫНШЫ ТАРАУ

АРНАЙЫ САЛЫСТЫРМАЛЫҚ ТЕОРИЯНЫҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

9.1.	Эйнштейн постулаттары	332
9.2.	Лоренц түрлендірулері	335
9.3.	Бірмезгілділіктің салыстырмалылығы	339
9.4.	Дененің ұзындығының салыстырмалылығы	342
9.5.	Жылдамдықтарды түрлендіру және қосу	346
9.6.	Релятивистік импульс. Ньютонның екінші заңының релятивистік түрі	348
9.7.	Масса мен энергияның байланысы	353
9.8.	Энергияның импульспен байланысы	357
9.9.	Тұйық жүйелер үшін энергиямен импульстің сақтау заңдары.....	359

ОНЫНШЫ ТАРАУ

СҰЙЫҚТАР МЕН ГАЗДАРДЫҢ МЕХАНИКАСЫ

10.1.	Сұйықтар мен газдардағы қысым. Қысымды өлшеу	366
10.2.	Паскаль және Архимед заңдары.....	369
10.3.	Дененің жүзу шарттары	377
10.4.	Қабатты (ламинарлық) және турбуленттік ағын. Сорғының үзіліссіздік теңдеуі.....	379
10.5.	Идеал сұйық үшін Бернуллі теңдеуі	382
10.6.	Бернуллі теңдеуінен шығатын салдарлар.....	388
10.7.	Сұйықтың тесіктен ағуы. Торичелли өрнегі	392
10.8.	Тұтқыр сұйықтардың қозғалысы. Ішкі үйкеліс күші.....	394
10.9.	Ламинарлық және турбуленттік ағындар	398
10.10.	Қимасы дөңгелек болатын құбырмен сұйықтың қозғалысы	401
10.11.	Сұйықтар мен газдардағы денелердің қозғалысы. Стокс формуласы.....	404
10.12.	Айналатын цилиндрге әсер ететін күштер. Магнус эффектісі	412
10.13.	Ұшақ қанатының көтергіш күші	415
10.14.	Дыбыстан жоғары жылдамдықпен қозғалу	416

ОН БІРІНШІ ТАРАУ

ТЕРБЕЛІСТЕР МЕН ТОЛҚЫНДАР

11.1. Серпімді және квазисерпімді күштердің әсерінен болатын тербелмелі қозғалыс	423
11.2. Математикалық және физикалық маятниктер	426
11.3. Жүйенің меншікті тербелістері	431
11.4. Тербелмелі қозғалыстағы дененің кинетикалық, потенциалдық және толық энергиясы	432
11.5. Ішкі үйкелісі бар тербелмелі жүйелердің қозғалыс теңдеулері.....	434
11.6. Мәжбүр тербелістер	440
11.7. Жүйенің автотербелістері	446
11.8. Механикалық тербелістердің біртекті және серпімді ортада таралуы	448
11.9. Жүгірме жазық (бірөлшемді) толқынның теңдеуі	455
11.10. Толқындардың фазалық және топтық жылдамдықтары	459
11.11. Толқындық қозғалысқа қатысушы ортаның бөлшектерінің ауытқуы, жылдамдығы және үдеуінің ілездік таралулары	462
11.12. Серпімді толқынның энергиясы. Толқынның интенсивтілігі	464
11.13. Толқындардың интерференциясы	468
11.14. Тұрғын толқындар	472
11.15. Тұрған толқынның кинетикалық және потенциалдық энергиясы....	481

ОН ЕКІНШІ ТАРАУ

АКУСТИКА

12.1. Дыбыс толқындарының табиғаты	489
12.2. Дыбыс көздері және дыбыс қабылдағыштары	493
12.3. Адамның дыбысты шығару және дыбыс есту аппараты	497
12.4. Дыбыстың объективтік және субъективтік сипаттамалары	501
12.5. Дыбыс жылдамдығы.....	507
12.6. Дыбыстың артық қысымы	509
12.7. Акустикадағы Допплер эффектісі	511
12.8. Ультрадыбыс	514
12.9. Инфрадыбыс.....	518
Әдебиеттер тізімі	526
Мазмұны	528